



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:

Nombre del jurado 1 (pertenencia)

Nombre del jurado 2 (pertenencia)

Nombre del jurado 3 (pertenencia)

*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.

Agradecimientos

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

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	4
2. Introducción específica	7
2.1. Protocolos de comunicación	7
2.1.1. Tecnologías Wi-Fi	7
2.1.2. Protocolo MQTT	7
2.2. Componentes de hardware utilizado	8
2.3. Tecnologías de software aplicadas	8
2.4. Requerimientos	8
3. Diseño e implementación	9
3.1. Arquitectura del sistema	9
3.2. Detalle de los módulos de hardware	9
3.3. Detalle del firmware desarrollado	9
3.4. Selección y configuración del software	9
3.5. Ciberseguridad del sistema	9
4. Ensayos y resultados	11
4.1. Banco de pruebas	11
4.2. Pruebas unitarias	11
4.3. Pruebas de sistema	11
4.4. Comparativa con el estado de arte	11
5. Conclusiones	13
5.1. Resultados obtenidos	13
5.2. Trabajo futuro	13
Bibliografía	15

Índice de figuras

1.1. Invernadero hogareño	2
1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT	3
2.1. Pila de protocolos para IoT.	7

Índice de tablas

1.1. Análisis del estado del arte	4
---------------------------------------------	---

Dedicado a... [OPCIONAL]

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

Al igual que en otros países, la jubilación o retiro en los Estados Unidos de América se caracteriza por dos condiciones: por un lado, dejar de formar parte de la fuerza laboral remunerada y, por el otro, percibir ingresos a través del seguro social, pensiones y/u otros mecanismos de ahorro [5].

Si bien en ese país es común jubilarse a los 65 años de edad, algunas personas encuentran atractiva la posibilidad de un retiro anticipado que otorgue una mayor cantidad de tiempo disponible para explorar nuevos *hobbies*, intereses o actividades. Sin embargo, para llevarlo a cabo de forma exitosa se requiere una base financiera sólida que garantice la seguridad económica [6].

Factores tales como el costo de vida, el acceso a la salud, la proximidad familiar y el clima, en ocasiones pueden motivar a los nuevos jubilados a realizar cambios en su lugar de residencia [7] [8]. Tal es el caso del cliente de este proyecto, que a raíz de su reciente jubilación anticipada, decidió comenzar una nueva vida en una finca rural ubicada en el estado de Carolina del Norte.

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. Frente a la diversidad de especies de plantas a cultivar, las condiciones climáticas y de riego deben ser flexibles para adaptarse a cada siembra.

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 [9].

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

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. 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.
- **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 entre otras, pH o conductividad eléctrica.
- **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.

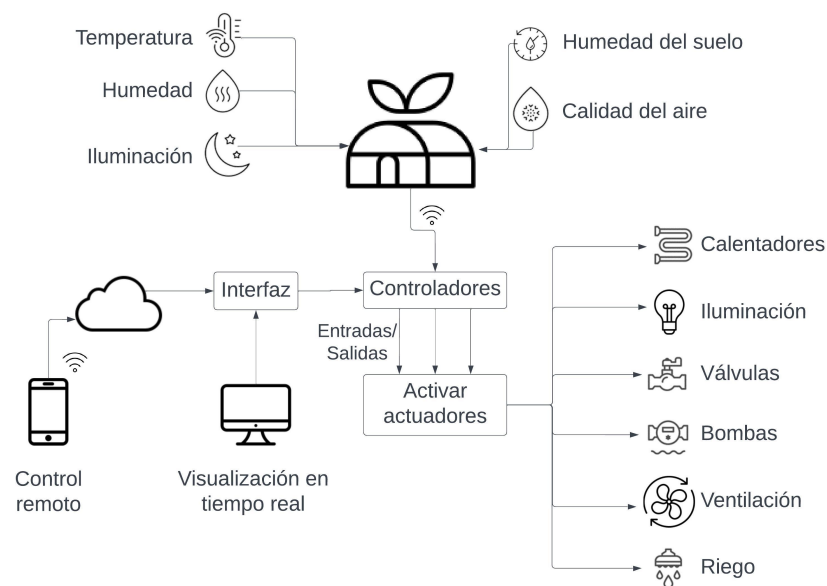


FIGURA 1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT².

²Imagen adaptada de *Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming* [10].

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.

TABLA 1.1. Análisis del estado del arte.

Funcionalidad	Priva ³	Argus Controls ⁴	Grodan ⁵	Growlink ⁶
Gestión de clima	Sí	Sí	Sí	Sí
Control de riego	Sí	Sí	Sí	Sí
Fertirrigación	Sí	Sí	Sí	Sí
Gestión de energía	Sí	No	Sí	Si
Tamaño de mercado	Grande	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 [15].

Una solución alternativa es utilizar kits de IoT los provistos por Arduino[16], que es una plataforma de hardware y software de código abierto. Por otro lado, es necesario contar con una comunidad de usuarios que colaboren en el proceso de desarrollo. No obstante, para usarlos de manera efectiva se requieren conocimientos de programación y electrónica, lo que los hace inaccesibles para el cultivador promedio [15].

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, herramientas y protocolos utilizados para la realización del trabajo.

2.1. Protocolos de comunicación

A continuación se describen los principales protocolos empleados en el trabajo. En la figura 2.1 se observa su posicionamiento en la pila de protocolos para IoT.

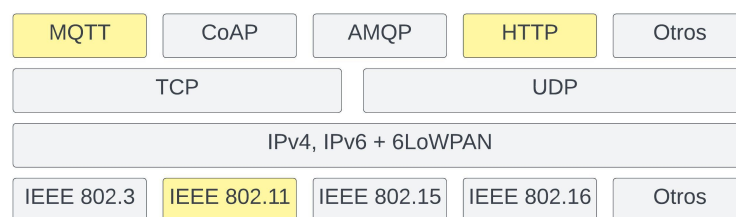


FIGURA 2.1. Pila de protocolos para IoT¹.

2.1.1. Tecnologías Wi-Fi

El estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas de área local (WLAN) es conocido comercialmente como Wi-Fi. Este estándar presenta dos modos de operación [18]

- 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. Para lograr esto, los nodos se organizan en una red donde todos son capaces de enrutar los paquetes.

2.1.2. Protocolo MQTT

MQTT es uno de los protocolos de comunicación M2M (*Machine to Machine*) más antiguos, introducido en 1999. Fue desarrollado por Andy Stanford-Clark de IBM y Areln Nipper de Arcom Control Systems Ltd[17]. Es un protocolo de mensajería basado en el modelo de publicación/suscripción diseñado especialmente para operar en dispositivos de bajo costo y consumo de energía, sobre redes de capacidades limitadas [19].

2.2. Componentes de hardware utilizado**2.3. Tecnologías de software aplicadas****2.4. Requerimientos**

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 del sistema**
- 3.2. Detalle de los módulos de hardware**
- 3.3. Detalle del firmware desarrollado**
- 3.4. Selección y configuración del software**
- 3.5. Ciberseguridad del sistema**

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] Zhe Li. *Retirement Trends in United States, 2000-2022*. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IN/IN11959>. Jun. de 2022. (Visitado 20-03-2023).
- [6] Rebecca Lake. *I Want to Retire at 55. How Can I Make That Happen?* <https://www.yahoo.com/now/retire-age-55-lets-run-203416606.html>. Feb. de 2023. (Visitado 20-03-2023).
- [7] AARP. *Relocation for Retirement - 10 Things You Should Consider*. Visitado el 2023-03-20. 2023. URL: <https://www.aarpmovingservices.com/blog/all-you-need-to-know-before-relocating-for-retirement>.
- [8] Ayoung Kim y Brigitte S. Waldorf. «Retirement, Relocation, and Residential Choices». En: *Labor Markets, Migration, and Mobility: Essays in Honor of Jacques Poot*. Ed. por William Cochrane, Michael P. Cameron y Omoniyi Alimi. Singapore: Springer Singapore, 2021, págs. 181-196. ISBN: 978-981-15-9275-1. DOI: [10.1007/978-981-15-9275-1_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9275-1_8). URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9275-1_8.
- [9] Intel. *¿Qué son los invernaderos inteligentes?* <https://agrofacto.com/invernaderos-inteligentes/m>. 2022. (Visitado 20-03-2023).
- [10] 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).
- [11] Priva. <https://www.priva.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [12] Argus Controls. <https://arguscontrols.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [13] Grodan. <https://www.grodan.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [14] Growlink. <https://www.growlink.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [15] Chet Udell y Alan Dennis Lloyd Nackley. <https://diggermagazine.com/the-smart-greenhouse/>. 2020. (Visitado 20-03-2023).
- [16] Arduino. <https://www.arduino.cc/>. (Visitado 20-03-2023).

- [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] Shanna L. «Comparative Analysis of Infrastructure and Ad-Hoc Wireless Networks». En: *ITM Web of Conferences 25, 01009* (2019).
- [19] Urs Hunkeler, Hong Linh Truong y Andy Stanford-Clark. «MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks». En: *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*. 2008, págs. 791-798. DOI: [10.1109/COMSWA.2008.4554519](https://doi.org/10.1109/COMSWA.2008.4554519).