



CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Sistema de monitoreo de cultivos agrícolas

Autor:

Ing. Mario Fernando Aguilar Montoya

Director:

Esp. Ing. Julian Bustamante Narvaez (TECREA SAS)

Jurados:

Dr. Ing. Javier Andrés Redolfi (UTN-FRSF)

Mg. Lic. Leopoldo Zimperz (FIUBA)

Esp. Ing. Felipe Calcavecchia (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en la ciudad de Tarija,
entre junio de 2022 y agosto de 2023.*

Resumen

En la presente memoria se aborda el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo de cultivos agrícolas realizado como emprendimiento personal. Este trabajo pretende ayudar al agricultor a gestionar de mejor manera sus recursos. Para su desarrollo fueron fundamentales los conocimientos adquiridos en la carrera tales como conceptos de modularización, testing de software, sistemas operativos en tiempo real, protocolos de comunicación y programación de microcontroladores.

Agradecimientos

En primer lugar a mi familia y amigos que siempre me brindan su apoyo y confianza.

A mi director por su paciencia, guía y consejo en todo momento.

A mis compañeros y maestros de la CESE, por los aportes y enseñanzas que me dieron a lo largo de la especialización.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Internet de las cosas	1
1.1.2. Sistemas de monitoreo de cultivos agrícolas	2
1.2. Estado del arte	2
1.2.1. Libelium	2
1.2.2. Nodo RF-M1 DropControl	3
1.3. Objetivo y alcances	4
1.3.1. Objetivo	4
1.3.2. Alcances	4
2. Introducción específica	5
2.1. Componentes principales de hardware	5
2.1.1. Plataforma de desarrollo STM32 NUCLEO-L432KC	5
2.1.2. Módulo De Comunicación LTE IOT 2 CLICK	6
2.1.3. Sensor AHT10	7
2.1.4. Sensor ML8511	7
2.1.5. Sensor de Humedad de Suelo HL-69 (Resistivo)	7
2.2. Herramientas de software y testing utilizados	8
2.2.1. STM32 CubeIDE	8
2.2.2. FreeRTOS	8
2.2.3. CEEDLING	9
2.3. Protocolos de Comunicación	9
2.3.1. UART	9
2.3.2. I2C	9
2.3.3. MQTT	9
2.4. Plataformas IoT	10
2.4.1. Ubidots	10
2.4.2. ThingsBoard	10
3. Diseño e implementación	11
3.1. Diagrama de bloques general del sistema	11
3.2. Arquitectura de firmware	12
4. Ensayos y resultados	13
4.1. Pruebas funcionales del hardware	13
5. Conclusiones	15
5.1. Conclusiones generales	15
5.2. Próximos pasos	15
Bibliografía	17

Índice de figuras

1.1. Modulo Smart Agriculture PRO.	3
1.2. Modulo RF-M1 de DropControl.	3
2.1. Plataforma de desarrollo NUCLEO-L432KC.	6
2.2. Módulo LTE IOT 2 CLICK.	6
2.3. Sensor AHT10.	7
2.4. Módulo Sensor ML8511.	7
2.5. Módulo Sensor HL-69.	8
2.6. Logo FreeRTOS.	8
2.7. Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT.	9
2.8. Ejemplo interfaz gráfica Ubidots.	10
2.9. Ejemplo interfaz gráfica ThingsBoard.	10
3.1. Diagrama general del sistema IoT.	11

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se hace una breve introducción a la necesidad que condujo al desarrollo del trabajo. Se presenta el concepto de internet de las cosas o IoT (del inglés *Internet of Things*) y el estado del arte de dispositivos similares. Asimismo, se explica el objetivo y los alcances del trabajo.

1.1. Introducción

En los últimos años la agricultura ha enfrentado muchos desafíos, desde una creciente población mundial a ser alimentada, hasta requisitos de sostenibilidad y restricciones ambientales debido al cambio climático y el calentamiento global.

La agricultura es uno de los sectores que más sufre la escasez de agua que existe actualmente en el mundo, uno de los objetivos de implementar la tecnología IoT en este sector, es el de lograr una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

Esto obliga a implementar soluciones que permitan modernizar las prácticas agrícolas. En este contexto, la Agricultura 4.0 representa la última evolución de la agricultura de precisión. La misma se encuentra basada en el concepto de agricultura inteligente, donde convergen el uso de internet de las cosas, computación en la nube, aprendizaje automático para el análisis de grandes volúmenes de datos, vehículos no tripulados y robótica [1].

1.1.1. Internet de las cosas

El concepto de internet de las cosas se refiere a la interconexión digital de dispositivos y objetos a través de una red, es decir, dispositivos como sensores y/o actuadores, equipados con una interfaz de comunicación, unidades de procesamiento y almacenamiento. Estos dispositivos tienen la capacidad de adquirir, intercambiar y transferir datos a la red mediante alguna tecnología de comunicación inalámbrica [2].

El IoT puede usarse a favor de la sostenibilidad, no cabe duda de que Internet es un facilitador de iniciativas sostenibles. De acuerdo con el Foro Económico Mundial la mayoría de los proyectos con internet de las cosas se centran en la eficiencia energética en las ciudades, energías sostenibles y el consumo responsable [3].

Por ejemplo:

- Eficiencia energética: en este sector se interconectan sensores, algoritmos y redes de comunicación para anticipar la demanda eléctrica y así realizar una distribución sostenible de la energía para reducir el precio del kW.

- Uso del agua: esta tecnología pone en funcionamiento máquinas para recoger datos en tiempo real que permitan hacer uso eficiente del agua y reducir su consumo.

1.1.2. Sistemas de monitoreo de cultivos agrícolas

Los sistemas de monitoreo de cultivos agrícolas se encargan de monitorear las distintas variables ambientales a las que están expuestos los cultivos agrícolas, los datos adquiridos ayudan a la toma de decisiones y a manejar de una manera eficiente los recursos con los que cuentan los agricultores.

Cuentan con tres partes fundamentales:

- El nodo sensor, que en sí sería la parte física o hardware, es generalmente de bajo consumo.
- El firmware que abarca la lógica del sistema y se encarga de realizar la adquisición, procesamiento y transferencia de datos que puede o no estar sobre un sistema operativo de tiempo real.
- Nube o plataforma IoT, que ofrecen diferentes servicios como ser almacenamiento, procesamiento, análisis, visualización, etc. Esta parte del sistema permite al usuario del sistema poder visualizar los valores de las variables medidas y así poder tomar decisiones con respecto a las mediciones.

1.2. Estado del arte

Durante la etapa de investigación del proyecto se realizó la búsqueda de productos comerciales en el mercado local e internacional. Se encontraron algunos productos de similares características al que se pretende realizar, un dato interesante a resaltar es que todos los productos encontrados son del mercado internacional, no se encontró ningún producto o empresa que ofrezca este tipo de soluciones en el mercado local.

A continuación se describen los productos encontrados, estas opciones varían con respecto a la tecnología que utilizan.

1.2.1. Libelium

Smart Agriculture PRO figura 1.1 es un módulo de IoT que está diseñado para realizar monitoreo de viñedos para mejorar la calidad del vino, riego selectivo en campos de golf y control de condiciones en invernaderos, entre otros. Permite monitorear múltiples parámetros ambientales que involucran una amplia gama de aplicaciones, desde el análisis del desarrollo en crecimiento hasta la observación del clima. Para ello se ha dotado de sensores de temperatura y humedad del aire y del suelo, luminosidad, radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, presión atmosférica, humedad de las hojas, distancia y diámetro del fruto o tronco [4].



FIGURA 1.1. Modulo Smart Agriculture PRO.

1.2.2. Nodo RF-M1 DropControl

El nodo RF-M1 es adecuado para tareas de monitoreo simples como parte de una red DropControl o por sí solo. Posee una combinación de entradas que le permite realizar múltiples tareas de monitoreo y almacenarlas en la nube. En la figura 1.2 se muestra el módulo físicamente [5].

Características del dispositivo:

- Redes RF *mesh* o comunicación celular.
- Energía autónoma, solar + batería.
- Actualización del firmware vía aérea, configuraciones y soporte por internet.
- Protección externa IP65.
- Amplia variedad de compatibilidad con sensores.
- Unidad de bajo costo para resolver necesidades básicas de monitoreo.



FIGURA 1.2. Modulo RF-M1 de DropControl.

1.3. Objetivo y alcances

1.3.1. Objetivo

El objetivo principal del trabajo es el diseño e implementación de un prototipo funcional de un sistema de monitoreo de cultivos agrícolas.

1.3.2. Alcances

- Implementación de un prototipo funcional con hardware de bajo consumo.
- Desarrollo del firmware sobre un sistema operativo de tiempo real.
- Transmisión de la información por red celular.
- Visualización de los datos en Ubidots.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se describen los componentes de hardware, software, protocolos de comunicación y plataformas IoT utilizados para realizar el trabajo.

2.1. Componentes principales de hardware

2.1.1. Plataforma de desarrollo STM32 NUCLEO-L432KC

La placa STM32 Nucleo-L432KC que se muestra en la figura 2.1 proporciona una forma asequible y flexible para que los usuarios prueben nuevos conceptos y construyan prototipos eligiendo entre las diversas combinaciones de funciones de rendimiento y consumo de energía que proporciona el microcontrolador STM32L4KC [6].

Características:

- Microcontrolador STM32L4KC en paquete 32 de pines.
- Led de usuario.
- Pulsador de reset.
- Conector de expansión Arduino Nano V3.
- Conector USB Micro-AB para ST-LINK.
- Opciones flexibles de fuente de alimentación.
- Depurador/programador ST-LINK integrado.
- Compatibilidad con una amplia variedad de entornos de desarrollo integrado.
- Oscilador de cristal de 24 MHz.
- Compatible con Arm Mbed Enabled.



FIGURA 2.1. Plataforma de desarrollo NUCLEO-L432KC.

2.1.2. Módulo De Comunicación LTE IOT 2 CLICK

LTE IoT 2 click que se muestra en la 2.2 está equipado con el módulo BG96 LTE de Quectel Wireless Solutions, que admite tecnologías LTE CAT M1 y NB1, desarrolladas para aplicaciones IoT. Además, admite EGPRS a 850/900/1800/1900 MHz, lo que significa que se puede usar globalmente; no está restringido a ninguna región [7].

Características:

- Protocolos de internet integrados (TCP/UDP/PPP).
- Conectores SMA integrados.
- Leds de alimentación e indicación de estado.
- Conector USB para conectarlo con la aplicación de software de Quectel.
- Interfaz UART.
- Tensión de alimentación 5 V o 3,3 V.



FIGURA 2.2. Módulo LTE IOT 2 CLICK.

2.1.3. Sensor AHT10

El sensor AHT10 presentado en la figura 2.3 permite obtener lecturas de temperatura y humedad, es de bajo costo y excelente rendimiento. Se utiliza este sensor en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, estaciones meteorológicas, aplicaciones en el hogar, regulador de humedad y temperatura [8].

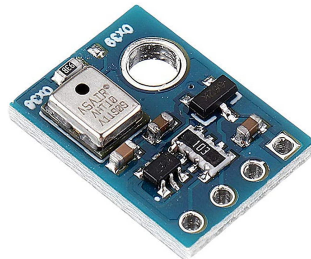


FIGURA 2.3. Sensor AHT10.

2.1.4. Sensor ML8511

El módulo ML8511 presentado en la figura 2.4 es un sensor de luz ultravioleta (UV), entrega una señal de tensión analógica que depende de la cantidad de luz UV que detecta. Sensor ideal para proyectos de monitoreo de condiciones ambientales como el índice UV, aplicaciones meteorológicas, cuidado de la piel, medición industrial de nivel UV. El sensor ML8511 detecta luz con una longitud de onda entre 280-390 nm, este rango cubre tanto al espectro UV-B como al UV-A. La salida analógica está relacionada linealmente con la intensidad UV (mW/cm^2) [9].



FIGURA 2.4. Módulo Sensor ML8511.

2.1.5. Sensor de Humedad de Suelo HL-69 (Resistivo)

El módulo HL-69 presentado en la figura 2.5, un sensor de humedad de suelo que utiliza la conductividad entre dos terminales para determinar parámetros relacionados a agua, líquidos y humedad [10].

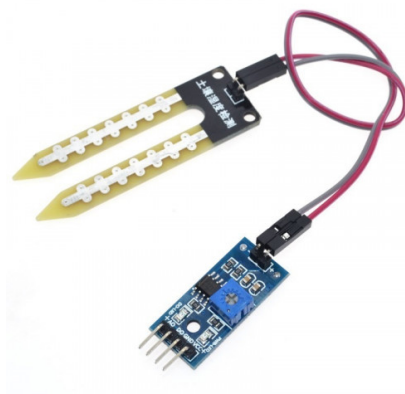


FIGURA 2.5. Módulo Sensor HL-69.

2.2. Herramientas de software y testing utilizados

2.2.1. STM32 CubeIDE

STM32CubeIDE es una herramienta de desarrollo multi-OS todo en uno, que forma parte del ecosistema de software STM32Cube. Se trata de una plataforma de desarrollo C/C++ avanzada con funciones de configuración de periféricos, generación de código, compilación de código y depuración para microcontroladores y microprocesadores STM32. Se basa en el marco Eclipse y la cadena de herramientas GCC para el desarrollo y GDB para la depuración. Permite la integración de los cientos de plugins existentes que completan las funcionalidades del IDE de Eclipse [11].

Integra las funcionalidades de configuración y creación de proyectos de STM32 de STM32CubeMX para ofrecer una experiencia de herramienta todo en uno y ahorrar tiempo de instalación y desarrollo [11].

2.2.2. FreeRTOS

FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real (RTOS) líder en el mercado para microcontroladores y pequeños microprocesadores. Distribuido libremente bajo la licencia de código abierto del MIT, FreeRTOS incluye un núcleo y un conjunto creciente de bibliotecas adecuadas para su uso en todos los sectores de la industria. FreeRTOS está diseñado con énfasis en la confiabilidad, la accesibilidad y la facilidad de uso [12]. El logo de FreeRTOS se muestra en la figura 2.6.



FIGURA 2.6. Logo FreeRTOS.

2.2.3. CEEDLING

Ceedling es un sistema de compilación diseñado para proyectos en lenguaje C, que podría describirse como una extensión del sistema de compilación Rake (similar a make) de Ruby. Ceedling está dirigido principalmente al desarrollo basado en pruebas en C y está diseñado para reunir CMock, Unity y CException [13].

2.3. Protocolos de Comunicación

2.3.1. UART

UART (*universal asynchronous receiver / transmitter*, por sus siglas en inglés) define un protocolo o un conjunto de normas para el intercambio de datos en serie entre dos dispositivos. UART es sumamente simple y utiliza solo dos hilos entre el transmisor y el receptor para transmitir y recibir en ambas direcciones. Ambos extremos tienen una conexión a masa. La comunicación en UART puede ser simplex (los datos se envían en una sola dirección), semidúplex (cada extremo se comunica, pero solo uno al mismo tiempo), o dúplex completo (ambos extremos pueden transmitir simultáneamente). Los datos se transmiten en forma de tramas [14].

2.3.2. I2C

El protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) es un protocolo diseñado para permitir la comunicación entre múltiples circuitos integrados digitales y uno o más chips controladores. Similar a la interfaz periférica en serie, está destinado a comunicaciones de corta distancia dentro de un solo dispositivo. Al igual que las interfaces seriales asíncronas, solo requiere dos cables de señal para el intercambio de información [15].

2.3.3. MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería estándar de OASIS para IoT. Está diseñado como un transporte de mensajería de publicación/suscripción extremadamente liviano que es ideal para conectar dispositivos remotos con un espacio de código pequeño y un ancho de banda de red mínimo. MQTT hoy en día se utiliza en una amplia variedad de industrias, como la automotriz, la manufactura, las telecomunicaciones, el petróleo y el gas, etc [16]. En la figura 2.7 se muestra la arquitectura del protocolo MQTT.

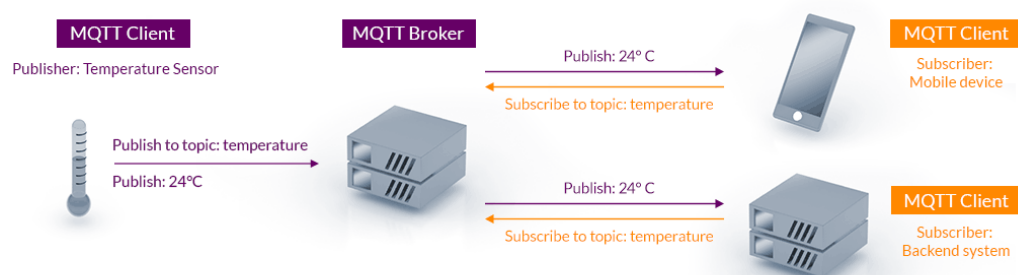


FIGURA 2.7. Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT.

2.4. Plataformas IoT

2.4.1. Ubidots

Ubidots es una plataforma de IoT que habilita la toma de decisiones a empresas de integración de sistemas a nivel global. Este producto permite enviar datos de sensores a la nube, configurar tableros y alertas, conectarse con otras plataformas, usar herramientas de analítica y arrojar mapas de datos en tiempo real [17]. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de interfaz gráfica en Ubidots.



FIGURA 2.8. Ejemplo interfaz gráfica Ubidots.

2.4.2. ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma IoT de código abierto para la recopilación, el procesamiento, la visualización y la gestión de dispositivos de datos. Permite la conectividad de dispositivos a través de protocolos IoT estándar de la industria: MQTT, CoAP y HTTP, y admite implementaciones en la nube y locales. ThingsBoard combina escalabilidad, tolerancia a fallas y rendimiento [18]. En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de una interfaz gráfica desarrollada en ThingsBoard.

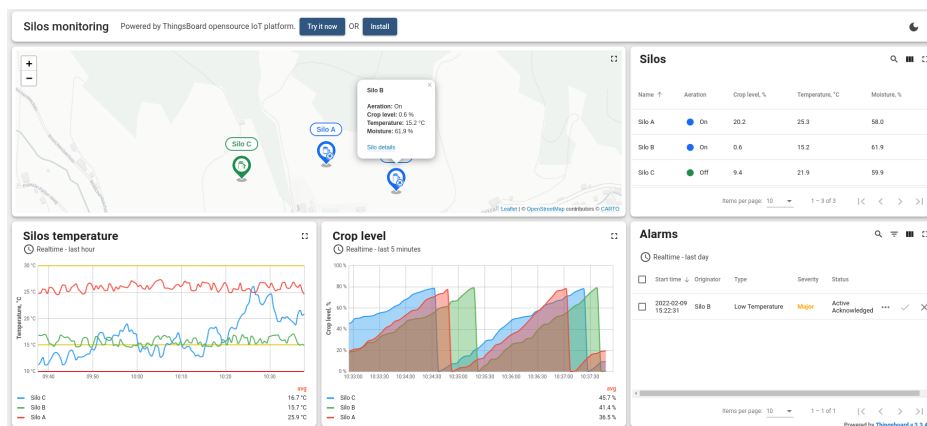


FIGURA 2.9. Ejemplo interfaz gráfica ThingsBoard.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se abordará la descripción de la arquitectura del sistema, arquitectura del firmware, detalles de los controladores desarrollados para el módulo de comunicación y los sensores, desarrollo del hardware y la configuración de la plataforma IoT.

3.1. Diagrama de bloques general del sistema

En la figura 3.1 se muestra el diagrama en bloques general del sistema donde se describe la arquitectura IoT que consta de tres capas: percepción, red y aplicación.

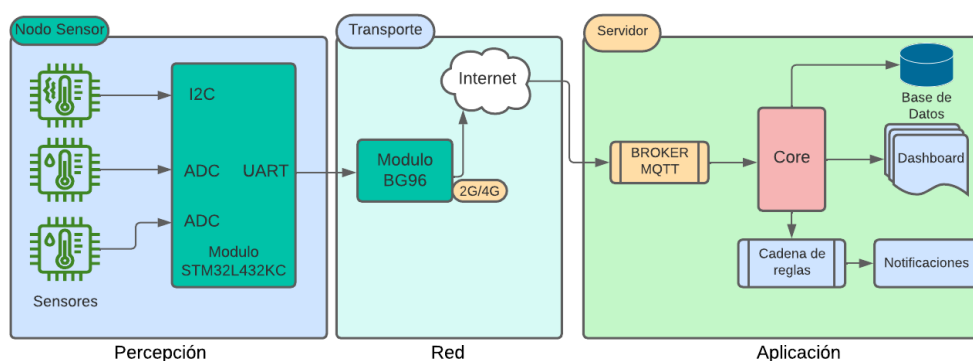


FIGURA 3.1. Diagrama general del sistema IoT.

En cada una de las capas, se despliegan tecnologías y componentes de hardware y software. A continuación se describe cada una de ellas.

- **Capa de percepción.** En la capa de percepción, los nodos sensores son los encargados de medir variables ambientales, hacer un preprocesamiento y enviarlas a la capa de red. Para su desarrollo se utilizó la placa STM32L432KC que contiene el firmware del sistema, también consta de un sensor de humedad y temperatura ambiente AHT10 que se comunica con la placa de desarrollo mediante el protocolo I2C, sensor de humedad de suelo HL-69 y el sensor de luz UV ML-18 que se comunican con el módulo mediante entradas analógicas.
- **Capa de red.** En cuanto a la red, se utilizó un módulo quectel BG96 que puede conectarse a la red 2G, 4G, NB-IoT automáticamente dependiendo del nivel de la red. En el lugar de la implementación del módulo sensor, se comunica con el microcontrolador por comandos AT por puerto UART.

- Capa de aplicación. En la capa de aplicación, se utilizó una plataforma IoT como servidor, que nos brinda las funcionalidades de broker MQTT para mandar los datos a la plataforma, base de datos para el almacenamiento, nos brinda la interfaz gráfica para la visualización de los datos y nos permite gestionar las alarmas del sistema.

3.2. Arquitectura de firmware

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
    las líneas de código irían aquí...
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo:

```
1 #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2 #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3 #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5 uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6 FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7 state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER]; //ON or OFF
8 state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER]; //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
28 }
```

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.2. Próximos pasos

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

Bibliografía

- [1] Sara Oleiro Araujo y col. «Characterising the Agriculture 4.0». En: *Agronomy* 11.4, 2021, pág. 667.
- [2] Marco Centenaro y col. «Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios». En: *IEEE Wireless Communications* 23.5, 2016, págs. 60-67.
- [3] Ferrovial. *Internet de las cosas(IoT)*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://www.ferrovial.com/es/recursos/internet-de-las-cosas/>.
- [4] Libelium. *Smart Agriculture PRO,TECHNICAL GUIDE*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://development.libelium.com/agriculture-sensor-guide/>.
- [5] WiseConn. *Nodo RF-M1*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://www.wiseconn.cl/dropcontrol/hardware/rf-m1/>.
- [6] STMicroelectronics. *Especificacion de Producto,STM32 Nucleo-32 boards*. Ultima actualizacion 2019-06-05 V8.0. URL: https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-l432kc.pdf.
- [7] MikroElectronic. *Especificacion de Producto,LTE IOT 2 CLICK*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://www.mikroe.com/lte-iot-2-click>.
- [8] SSDIELECT ELECTRONICA SAS. *Especificacion de Producto,AHT10 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD I2C*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://ssdielect.com/temperatura/3885-aht10.html>.
- [9] naylampmechatronics. *Especificacion de Producto,MÓDULO SENSOR DE LUZ ULTRAVIOLETA (UV) ML8511*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://ssdielect.com/temperatura/3885-aht10.html>.
- [10] PANAMAHITEK. *Especificacion de Producto,Módulo HL-69: Un sensor de humedad de suelo*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://panamahitek.com/modulo-hl-69-un-sensor-de-humedad-de-suelo/>.
- [11] STMicroelectronics. *Descripción del producto,Integrated Development Environment for STM32*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.
- [12] FreeRTOS. *Acerca del Sistema Operativo,Descripción General*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://www.freertos.org/RTOS.html>.
- [13] CEEDLING. *Descripción del producto,Descripción General*. Visitado: 2023-05-27. URL: <http://www.throwtheswitch.org/ceedling>.
- [14] rohde-schwarz. *Descripción del protocolo,Qué es UART*. Visitado: 2023-05-27. URL: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/que-es-uart_254524.html.
- [15] sparkfun. *Definicion del Protocolo*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>.
- [16] MQTT. *Descripción del protocolo,Introduccion a MQTT*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://mqtt.org/>.
- [17] connectamericas. *Descripción de la empresa,Definición de UBIDOTS*. Visitado: 2023-05-27. URL: <https://connectamericas.com/es/company/ubidots>.

- [18] ThingsBoard. *Descripción de la plataforma IoT, Definición de ThingsBoard*.
Visitado: 2023-05-27. URL: <https://thingsboard.io/>.