



## 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

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Introducción específica</b>	<b>5</b>
2.1. Componentes principales de hardware	5
2.1.1. STM32 NUCLEO-L432KC	5
2.1.2. Modulo Comunicacion LTE IOT 2 CLICK	6
2.1.3. Sensor AHT10	6
2.1.4. Sensor ML8511	7
2.1.5. Sensor de Humedad de Suelo HL-69 (Resistivo)	7
2.1.6. Tablas	8
2.1.7. Ecuaciones	9
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>11</b>
3.1. Análisis del software	11
<b>4. Ensayos y resultados</b>	<b>13</b>
4.1. Pruebas funcionales del hardware	13
<b>5. Conclusiones</b>	<b>15</b>
5.1. Conclusiones generales	15
5.2. Próximos pasos	15
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>





# Índice de figuras

1.1. Modulo Smart Agriculture PRO. . . . .	3
1.2. Modulo RF-M1 de DropControl. . . . .	3
2.1. Modulo LTE IOT 2 CLICK. . . . .	6
2.2. Modulo LTE IOT 2 CLICK. . . . .	6
2.3. Modulo LTE IOT 2 CLICK. . . . .	7
2.4. Modulo LTE IOT 2 CLICK. . . . .	7
2.5. Modulo LTE IOT 2 CLICK. . . . .	8
2.6. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo. . . . .	9
2.7. Imagen tomada de la página oficial del procesador <sup>1</sup> . . . . .	9
2.8. ¿Por qué de pronto aparece esta figura? . . . . .	10
2.9. Tres gráficos simples . . . . .	10



# Índice de tablas

2.1. caption corto . . . . .	9
------------------------------	---



# Capítulo 1

## Introducción general

En este capítulo se hace una breve introducción a la necesidad que condujo al desarrollo del trabajo. Se presenta el internet de las cosas 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 o IoT (del inglés Internet of Things) 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, 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 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

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

### 2.1. Componentes principales de hardware

#### 2.1.1. STM32 NUCLEO-L432KC

La placa STM32 Nucleo-32 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 STM32.

Características:

- Microcontrolador STM32L4KC en paquete 32 de pines.
- 1 led de usuario.
- 1 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 24MHz
- Compatible con Arm Mbed Enabled



FIGURA 2.1. Modulo LTE IOT 2 CLICK.

### 2.1.2. Modulo Comunicacion LTE IOT 2 CLICK

LTE IoT 2 click está equipado con el módulo BG96 LTE de Quectel Wireless Solutions , que admite tecnologías LTE CAT M1 y NB1, desarrolladas con aplicaciones IoT en mente. Además, admite EGPRS a 850/900/1800/1900 MHz, lo que significa que se puede usar globalmente; no está restringido a ninguna región. El soporte para las tecnologías CAT M1 y NB1 y el consumo de energía ultra bajo hacen de este módulo una elección perfecta para la próxima tecnología 3GPP IoT.



FIGURA 2.2. Modulo LTE IOT 2 CLICK.

### 2.1.3. Sensor AHT10

AHT10 es un sensor que permite obtener lecturas de temperatura y humedad, es de bajo costo y excelente rendimiento. El sensor es muy versátil, puede sustituir a los sensores DHT11, SHT20 y AM2302, debido a su estabilidad en entornos más hostiles. Utiliza este sensor en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, estaciones meteorológicas, aplicaciones en el hogar, regulador de humedad y temperatura.

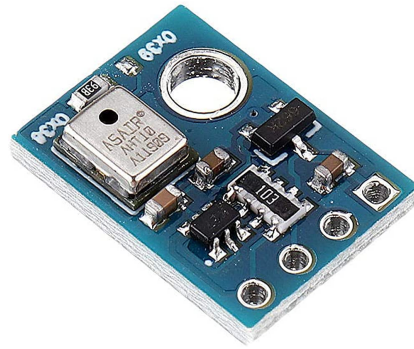


FIGURA 2.3. Modulo LTE IOT 2 CLICK.

#### 2.1.4. Sensor ML8511

El módulo ML8511 es un sensor de luz ultravioleta (UV), entrega una señal de voltaje 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 ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ). Esta señal analógica puede ser conectada a un microcontrolador para ser convertido por un ADC y así trabajar con la medición.



FIGURA 2.4. Modulo LTE IOT 2 CLICK.

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

Al insertar figuras en la memoria se deben considerar determinadas pautas. Para empezar, usar siempre tipografía claramente legible. Luego, tener claro que **es incorrecto** escribir por ejemplo esto: “El diseño elegido es un cuadrado, como se ve en la siguiente figura:”

La forma correcta de utilizar una figura es con referencias cruzadas, por ejemplo: “Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, como puede observarse en la figura 2.6”.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia

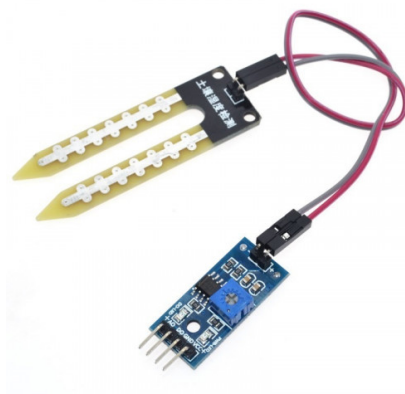


FIGURA 2.5. Modulo LTE IOT 2 CLICK.



de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.7.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.8, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

Otra posibilidad es utilizar el entorno *subfigure* para incluir más de una figura, como se puede ver en la figura 2.9. Notar que se pueden referenciar también las figuras internas individualmente de esta manera: 2.9a, 2.9b y 2.9c.

El código para generar las imágenes se encuentra disponible para su reutilización en el archivo **Chapter2.tex**.

### 2.1.6. Tablas

Para las tablas utilizar el mismo formato que para las figuras, sólo que el epígrafe se debe colocar arriba de la tabla, como se ilustra en la tabla 2.1. Observar que sólo algunas filas van con líneas visibles y notar el uso de las negritas para los encabezados. La referencia se logra utilizando el comando `\ref{<label>}` donde label debe estar definida dentro del entorno de la tabla.

```
\begin{table}[h]
\centering
```

---

<sup>1</sup>Imagen tomada de <https://goo.gl/images/i7C70w>



FIGURA 2.6. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.



FIGURA 2.7. Imagen tomada de la página oficial del procesador<sup>1</sup>.

```
\caption[caption corto]{caption largo más descriptivo}
\begin{tabular}{l c c}
\toprule
\textbf{Especie} & \textbf{Tamaño} & \textbf{Valor}\\
\midrule
Amphiprion Ocellaris & 10 cm & \$ 6.000 \\
Hepatus Blue Tang & 15 cm & \$ 7.000 \\
Zebrasoma Xanthurus & 12 cm & \$ 6.800 \\
\bottomrule
\hline
\end{tabular}
\label{tab:peces}
\end{table}
```

TABLA 2.1. caption largo más descriptivo

Especie	Tamaño	Valor
Amphiprion Ocellaris	10 cm	\$ 6.000
Hepatus Blue Tang	15 cm	\$ 7.000
Zebrasoma Xanthurus	12 cm	\$ 6.800

En cada capítulo se debe reiniciar el número de conteo de las figuras y las tablas, por ejemplo, figura 2.1 o tabla 2.1, pero no se debe reiniciar el conteo en cada sección. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

### 2.1.7. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria dentro de un entorno *equation*, éstas se numeran en forma automática y se pueden referir al igual que como se hace con las figuras y tablas, por ejemplo ver la ecuación 2.1.

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$



FIGURA 2.8. ¿Por qué de pronto aparece esta figura?



(A) Un caption.



(B) Otro.



(C) Y otro más.

FIGURA 2.9. Tres gráficos simples

Es importante tener presente que si bien las ecuaciones pueden ser referidas por su número, también es correcto utilizar los dos puntos, como por ejemplo “la expresión matemática que describe este comportamiento es la siguiente:”

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r}) \Psi = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```
\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1-k\sigma^2} + \right.
\sigma^2 \left[ d\theta^2 + \right.
\sin^2\theta d\phi^2 \left. \right] \left. \right)
\end{equation}
```

Y para la ecuación 2.2:

```
\begin{equation}
\label{eq:schrodinger}
\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r}) \Psi =
-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}
\end{equation}
```

## Capítulo 3

# Diseño e implementación

### 3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno `lstlisting` con el siguiente código:

```
\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: 2023-06-27. URL: <https://www.ferrovial.com/es/recursos/internet-de-las-cosas/>.
- [4] Libelium. *Smart Agriculture PRO,TECHNICAL GUIDE*. Visitado: 2023-06-27. URL: <https://development.libelium.com/agriculture-sensor-guide/>.
- [5] WiseConn. *Nodo RF-M1*. Visitado: 2023-06-27. URL: <https://www.wiseconn.cl/dropcontrol/hardware/rf-m1/>.