



Facultad de **Ingeniería**  
Oberá - Misiones



Universidad Nacional de Misiones

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES**

## **Facultad de Ingeniería**

**Carrera: Ingeniería Electrónica**

**Asignatura: Proyecto y Diseño Electrónico ET546**

**Diseño de sistema para el monitoreo y registro de eventos  
en frigoríficos farmacéuticos**

Desarrollado por

**Quel, Juan Esteban**  
**juanq99@live.com**

**Bernal, Nicolás Elías**  
**bernal.e.nicolas@gmail.com**

**Oberá, Misiones**

Noviembre de 2023



# **Diseño de sistema para el monitoreo y registro de eventos en frigoríficos farmacéuticos**

Desarrollado por

**Quel, Juan Esteban**  
**juanq99@live.com**  
**Q-3029/5**

**Bernal, Nicolás Elías**  
**bernal.e.nicolas@gmail.com**  
**B-3609/9**

## **Proyecto y Diseño Electrónico ET546**

Aprobado por

---

Korpys, Ricardo; Skrauba, Axel  
*Profesor tutor*

---

Fernández, Guillermo  
*Profesor lector*

---

Kolodziej, Javier  
*Profesor lector*

Noviembre de 2023



## **Resumen**

# **Diseño de sistema para el monitoreo y registro de eventos en frigoríficos farmacéuticos**

Desarrollado por

**Quel, Juan Esteban**

**Bernal, Nicolás Elías**

Universidad Nacional de Misiones

Facultad de Ingeniería

Profesor tutor: Korpys, Ricardo; Skrauba, Axel

Noviembre de 2023

Este trabajo trata del diseño y construcción de un sistema de monitoreo de equipos frigoríficos destinados para el almacenamiento y conservación de productos farmacéuticos. El proyecto es un trabajo en colaboración de la Facultad de Ingeniería con el Servicio Médico Asistencial Universidad Nacional de Misiones (SMAUNaM), que brinda atención a los estudiantes de la UNaM, con sedes en las localidades de Oberá, Eldorado y Posadas. La motivación del proyecto es proveer una herramienta que facilite la visualización y control de las variables de temperatura y humedad relativa para asegurar el cuidado y calidad de los productos farmacéuticos, cumpliendo con las normas que exigen las entidades de la ANMAT y el IRAM. Para ello, se emplea un sistema de alamas visuales y auditivas para informar las irregularidades de las condiciones de almacenamiento preestablecidas. Además, se permite la consulta remota del estado de los equipos por medio de un bot ejecutado en el servicio de mensajería libre y gratuita Telegram, en conjunto de un display instalado en el lugar de medición, de manera de relevar en todo momento las condiciones de almacenamiento de los medicamentos. El sistema se basa en el microcontrolador ESP8266, que ofrece conexión WIFI, y que ejecuta el programa que muestrea las variables mencionadas mediante los sensores AHT10, que posteriormente son comparados con los límites establecidos por el usuario y realiza los procedimientos de alertas mediante los distintos periféricos y envío de avisos a los distintos usuarios habilitados del sistema mediante el bot de Telegram. Además, el sistema cuenta con un fuente de energía de reserva, compuesta por baterías del tipo Li-Ion, con el que logra una autonomía de veinticuatro horas sin conexión a la energía proveída de la red eléctrica. Esta característica permite garantizar el servicio de monitoreo en una situación crítica como la descripta.

**Palabras claves:** ANMAT, bot, ESP8266, Humedad Relativa, I2C, IRAM, Monitoreo, Temperatura, Telegram.

---

## **Acerca de Proyecto y Diseño Electrónico**

El Proyecto Electrónico es un curso anual bajo la modalidad de trabajo individual o grupal supervisado, con el propósito de aplicar estrategias de diseño y análisis a un problema de temática abierta de la ingeniería electrónica.



## **Abstract**

# **Redesign of a temperature monitoring system for pharmaceutical refrigerators with greater precision and alarm notification.**

Translated from the original spanish title: “Diseño de sistema para el monitoreo y registro de eventos en frigoríficos farmacéuticos”

by

**Quel, Juan Esteban**

**Bernal, Nicolás Elías**

National University of Misiones

Engineering Faculty

Tutor: Korpys, Ricardo; Skrauba, Axel

November of 2023

This work deals with the design and construction of a monitoring system for refrigeration equipment intended for the storage and conservation of pharmaceutical products. The project is a collaborative effort between the Faculty of Engineering and the National University of Misiones Medical Assistance Service (SMAUNaM), which provides care to UNaM students, with offices in the towns of Oberá, Eldorado and Posadas. The motivation of the project is to provide a tool that facilitates the visualization and control of temperature and relative humidity variables to ensure the care and quality of pharmaceutical products, complying with the standards required by the ANMAT and IRAM entities. For this, a system of visual and auditory alarms is used to report irregularities in the pre-established storage conditions. In addition, remote consultation of the status of the equipment is allowed through a bot executed in the free and free messaging service Telegram, together with a display installed in the measurement location, in order to reveal the storage conditions of the medicines at all times. The system is based on the ESP8266 microcontroller, which offers a WIFI connection, and which executes the program that samples the aforementioned variables through the AHT15 sensors, which are later compared with the limits established by the user and performs the alert procedures through the different peripherals and sending notices to the different enabled users of the system through the Telegram bot. In addition, the system has a reserve power source, made up of Li-Ion type batteries, with which it achieves a twenty-four hour autonomy without connection to the power provided by the electrical network. This characteristic makes it possible to guarantee the monitoring service in a critical situation such as the one described.

**Keywords:** ANMAT, bot, ESP8266, Humedad Relativa, I2C, IRAM, Monitoreo, Temperatura, Telegram.

---

**About Proyecto y Diseño Electrónico (“Electronic Project”)**

The “Electronic Project” is a course of supervised individual or group work of one semester, with the purpose of applying design and analysis strategies to a problem in an open topic in electrical engineering.

*Dedicado a nuestras familias y amigos.*

## **Agradecimientos**



# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de fotografías</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de listados</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Aspectos generales . . . . .	1
1.2. Normativa . . . . .	1
1.2.1. ANMAT: Disposición N.º 3475/2005 . . . . .	2
1.2.2. IRAM 80101:2001 . . . . .	2
1.2.3. IRAM 37018-1:1998 . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
<b>2 Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Consideraciones Generales . . . . .	5
2.1.1. Estructura General . . . . .	6
2.2. Definiciones . . . . .	7
2.2.1. Internet de las cosas . . . . .	7
2.2.2. Telegram . . . . .	8
<b>3 Selección de componentes</b>	<b>9</b>
3.1. Sensor de Temperatura y Humedad . . . . .	9
3.2. Interfaz de usuario: Display . . . . .	14
3.3. Microcontrolador . . . . .	16
3.3.1. Criterios de selección . . . . .	16
3.3.2. Opciones de microcontrolador . . . . .	18
3.4. Fuente Step-up . . . . .	19

3.5.	Sistema de energía de reserva . . . . .	21
3.5.1.	Batería . . . . .	21
3.5.2.	Círculo de carga . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Diseño de Hardware</b>	<b>29</b>
4.1.	LEDs, buzzer y pulsador . . . . .	29
4.2.	Comunicación I2C . . . . .	31
4.3.	<i>Load Sharing</i> . . . . .	34
4.4.	Esquemático y PCB . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Diseño de gabinete</b>	<b>39</b>
5.1.	Tapa Frontal . . . . .	40
5.2.	Caja . . . . .	41
5.3.	Botón . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Software</b>	<b>45</b>
6.1.	Entorno de desarrollo . . . . .	45
6.1.1.	Visual Studio Code . . . . .	45
6.1.2.	PlatformIO . . . . .	46
6.2.	Estructura del programa . . . . .	47
6.2.1.	Requerimientos de Librerías . . . . .	48
6.3.	Inicialización y configuración de E/S digitales . . . . .	49
6.4.	Rutinas de Servicio a la Interrupción (RSI) . . . . .	51
6.4.1.	RSI: Temporizador . . . . .	51
6.4.2.	RSI:Pulsador . . . . .	53
6.5.	Control y monitoreo continuo . . . . .	54
6.6.	Atención de consultas de Telegram . . . . .	55
6.6.1.	Configuración de bot . . . . .	55
6.6.2.	Rutina de atención a solicitudes . . . . .	55
6.7.	Optimización de energía . . . . .	58
6.8.	Display . . . . .	61
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>63</b>
7.1.	Desempeño del protocolo I2C a larga distancia . . . . .	63
7.1.1.	Determinación del $t_r$ y $t_f$ del bus . . . . .	64
7.2.	Autonomía del sistema . . . . .	67
7.2.1.	Consumo de corriente durante el modo de suspensión . . . . .	67
7.2.2.	Ensayo de monitoreo de tensión . . . . .	68
7.3.	Diseño y elaboración de la primera versión del prototipo . . . . .	70
7.3.1.	Diseño de PCB y montaje . . . . .	71
7.3.2.	Interfaz de Telegram . . . . .	74
7.4.	Diseño y elaboración de la versión final . . . . .	77

7.4.1.	Elaboración y diseño del PCB . . . . .	77
7.4.2.	Elaboración y diseño del gabinete . . . . .	79
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Creación de bot en Telegram</b>	<b>83</b>
<b>B</b>	<b>Gabinete: Dimensiones</b>	<b>87</b>

# Índice de figuras

2.1.	Diagrama de bloques general del sistema de monitoreo . . . . .	6
3.1.	Esquema general del protocolo de comunicación One Wire . . . . .	10
3.2.	Esquema de conexión del protocolo de comunicación I2C . . . . .	11
3.3.	Sensor digital de temperatura y humedad relativa AHT10 . . . . .	13
3.4.	LCD de 16x2 en conjunto con el módulo de comunicación I2C (PCF8574) . . . . .	15
3.5.	Display OLED de 128x64 píxeles . . . . .	15
3.6.	Esquemático de la fuente Step-up . . . . .	20
3.7.	Factor de corrección por el uso de la fuente Step-up . . . . .	24
3.8.	Algoritmo de carga para baterías Li-Ion . . . . .	25
3.9.	Esquemático del circuito de carga para batería Li-Ion . . . . .	25
4.1.	Circuito de conexión de LEDs, <i>buzzer</i> y pulsador del sistema . . . . .	31
4.2.	Diagrama de conexión I2C . . . . .	33
4.3.	Configuración “Load Sharing” . . . . .	35
4.4.	Esquemático completo de la placa principal del sistema . . . . .	36
5.1.	Tapa de Gabinete: Vista frontal . . . . .	40
5.2.	Tapa de Gabinete: Vista posterior . . . . .	41
5.3.	Caja de Gabinete: Vista Frontal . . . . .	41
5.4.	Caja de gabinete: Aberturas . . . . .	42
(a).	Caja: Vista inferior . . . . .	42
(b).	Caja: Vista lateral derecha . . . . .	42
5.5.	Botón de gabinete . . . . .	42
(a).	Botón: Vista frontal . . . . .	42
(b).	Caja: Vista superior . . . . .	42

6.1.	Logo de Visual Studio Code . . . . .	46
6.2.	Logo de PlatformIO . . . . .	46
6.3.	Diagrama de bloques para carga de códigos en plataformas . . . . .	47
6.4.	Diagrama de Flujo de la RSI Temporizador . . . . .	52
6.5.	Diagrama de Flujo de la RSI Pulsador . . . . .	53
6.6.	Diagrama de Flujo de la Rutina de Muestreo-Control continuo de temperatura y humedad relativa para cada uno de los equipos refrigerantes . . . . .	54
6.7.	Diagrama de Flujo de la Rutina de atención de comandos por Telegram . . . . .	56
6.8.	Algoritmo del perfil de carga ante la ausencia de la fuente de alimentación principal . . . . .	59
6.9.	Diagrama de flujo de la rutina realizada luego del modo de suspensión . . . . .	61
7.1.	Tiempo de subida de la señal SCL . . . . .	65
7.2.	Tiempo de bajada de la señal SCL . . . . .	65
7.3.	Constante de tiempo $\tau$ medida de la señal SCL . . . . .	66
7.4.	Corriente de consumo del microcontrolador con modo de suspensión Light-Sleep Forzado	68
7.5.	Circuito adaptador de voltaje para ensayo de autonomía . . . . .	69
7.6.	Evolución del voltaje de la batería en función del tiempo durante 24 horas . . . . .	70
7.7.	Circuito completo de la primera versión del sistema . . . . .	71
7.8.	Vista inferior del PCB . . . . .	72
7.9.	Vista 3D de la placa . . . . .	73
7.10.	Interfaz de usuario del bot de Telegram(1) . . . . .	75
7.11.	Interfaz de usuario del bot de Telegram(2) . . . . .	76
7.12.	Capa de cobre de la vista anterior del PCB . . . . .	78
7.13.	Dispoción de componentes de la vista anterior del PCB . . . . .	78
7.14.	Capa de cobre de la vista posterior del PCB . . . . .	79
7.15.	Dispoción de componentes de la vista posterior del PCB . . . . .	79
A.1.	Búsqueda de BotFather en el buscador de Telegram . . . . .	83
A.2.	Espacio de conversación con BotFather . . . . .	84
A.3.	Inicio de creación de bot . . . . .	84
A.4.	Ingreso de nombre del bot . . . . .	85
A.5.	Ingreso de <i>username</i> del bot . . . . .	85

# Índice de fotografías

7.1. Vista exterior del gabinete . . . . .	73
7.2. Vista interior del gabinete . . . . .	74

# Índice de tablas

3.1. Desempeño de los sensores como sensores de humedad relativa . . . . .	12
3.2. Desempeño de los sensores como sensores de temperatura . . . . .	13
3.3. Características técnicas de los sensores de temperatura y humedad relativa . . . . .	13
3.4. Tabla comparativa de las características físicas y eléctricas de los display LCD y OLED . . . . .	16
3.5. Componentes seleccionados utilizados en el sistema . . . . .	17
3.6. Comparación de los distintos microcontroladores disponibles en el mercado . . . . .	18
3.7. Parámetros principales del MT3608 . . . . .	20
3.8. Componentes de la fuente Step-up . . . . .	21
3.9. Comparación de baterías Li-Ion y NiMH . . . . .	22
3.10. Condiciones de funcionamiento del sistema la energía de respaldo . . . . .	23
3.11. Niveles de voltajes de protección del DW01-P . . . . .	26
3.12. Tiempo de retardo para la acción de las protecciones del DW01-P . . . . .	26
4.1. Lista de componentes de la placa principal del sistema . . . . .	37
6.1. Desempeño de las GPIOs del NodeMCU V3.0 como entradas y salidas . . . . .	50
6.2. Asignación y modo de operación de las GPIOs . . . . .	51
6.3. Modos de suspensión del ESP8266 . . . . .	59
7.1. Especificaciones de tiempo del AHT15 para una transmisión I2C estándar . . . . .	64

# Índice de listados

## Capítulo 1

# Introducción

### 1.1. Aspectos generales

La correcta conservación de los productos farmacéuticos es esencial para garantizar su eficacia y seguridad en el tratamiento de diversas enfermedades. Para lograrlo, es necesario que se cumplan ciertas condiciones, como la temperatura adecuada de almacenamiento. En este sentido, el monitoreo de la temperatura de los frigoríficos se convierte en una práctica esencial en el ámbito farmacéutico, que permite asegurar la calidad de los medicamentos y otros productos almacenados.

Además de la temperatura, la humedad relativa en el interior del frigorífico es igualmente importante de monitorear. La humedad excesiva o insuficiente puede afectar la calidad y estabilidad de los productos farmacéuticos almacenados. Un alto nivel de humedad puede aumentar el riesgo de contaminación microbiana y acelerar la degradación de los ingredientes activos, mientras que una humedad baja puede provocar la deshidratación de los productos y disminuir su eficacia.

La humedad relativa (HR –o RH en inglés-) es la cantidad de vapor de agua presente en el aire expresada como un porcentaje de la cantidad necesaria para lograr la saturación a esa temperatura[1]. La humedad relativa es fuertemente proporcional a la temperatura y altamente sensible a sus cambios. Esto significa que si tiene una temperatura estable en su sistema, su humedad relativa también lo será. Además de la temperatura, la humedad relativa también depende de la presión del sistema en cuestión.

La humedad es un elemento vital para el control de humedad relativa en las áreas de almacenamiento de los productos farmacéuticos, ya que un ambiente con la humedad relativa muy elevada favorece el crecimiento de microrganismos, oxidación y humedecimiento de productos farmacéuticos[1]. Por lo que, de acuerdo con la OMS, los rangos en porcentaje de humedad relativa deben estar entre 50 y 70 para mantener el rango idóneo de estabilidad.

Por lo tanto, medir y controlar la humedad relativa del frigorífico es esencial para asegurar que los productos farmacéuticos se almacenen en las condiciones adecuadas y se mantengan seguros y eficaces durante todo el período de almacenamiento. El cálculo del punto de rocío o punto de congelamiento es una técnica que se utiliza comúnmente para monitorear la humedad relativa del frigorífico.

### 1.2. Normativa

En Argentina se rigen por varias entidades que expresan lo siguiente:

### 1.2.1. ANMAT: Disposición N.º 3475/2005

De acuerdo con lo establecido por la ANMAT en la disposición N.º 3475/2005 “Reglamento Técnico Mercosur sobre Buenas Prácticas de Distribución de Productos Farmacéuticos”[2], es obligatorio que los equipos frigoríficos sean controlados continuamente por termómetros. Además, se deben realizar mediciones de temperatura y registrarlas por un responsable con la frecuencia necesaria para garantizar la integridad de los productos almacenados y la corrección de cualquier anormalidad en el menor tiempo posible. Se recalca también que todos los equipamientos, refrigeradores, congeladores y cámaras frías deben poseer un sistema de alarma.

### 1.2.2. IRAM 80101:2001

La norma IRAM 80101:2001 “Análisis clínicos Reactivos para diagnóstico in vitro. Conservación de la cadena de frío. Almacenamiento, transporte y distribución” establece los rangos de temperatura al cual deben estar los medicamentos dependiendo del objetivo que se persiga. Para refrigeración la temperatura debe mantenerse entre 2°C y 8°C para mantener un estado óptimo de los mismos. En el caso de congelación, la temperatura debe ser inferior a 10°C.

También hace mención a que la cámara de almacenamiento debe estar dotada de registradores de temperatura que aseguren un monitoreo continuo, y poder adoptar medidas en caso de emergencia. Se destaca que las medidas de control deben permitir un seguimiento de las condiciones de funcionamiento de los equipos a distancia e inclusive fuera del horario laboral, por ejemplo, alarmas ópticas o acústicas. Y además, se debe asegurar, el funcionamiento del control aún bajo el corte de la energía externa.

### 1.2.3. IRAM 37018-1:1998

La norma IRAM 37018-1:1998 “Medicamentos - Conservación de la cadena de frío en su distribución - Almacenamiento.” también es utilizada como guía en el ámbito farmaceútico y hace mención a cuestiones similares a las ya descriptas en las normas anteriores, referidas al monitoreo, temperatura, etc.

En lo que respecta a las condiciones de humedad relativa, las normativas vigentes en las actualidad no exigen valores específicos del ambiente donde se almacenarán los productos farmacéuticos en estado de refrigeración. Sin embargo, investigaciones realizadas en [3] y [4] demuestran que los medicamentos expuestos a ambientes con una humedad relativa por encima del 75 % presentan una aceleración en su degradación debido a la reacción de los ingredientes activos presentes en estos.

## 1.3. Objetivos

En este proyecto se describe el diseño de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad relativa de los frigoríficos ubicados en las farmacias de la SMAUNaM de la ciudad de Posadas, Oberá y Eldorado, con el fin de cumplir con los estándares establecidos para la conservación de los productos farmacéuticos. Manteniendo un rango de temperatura entre 2°C y 8°C en cuanto a la temperatura, y humedad relativa menor al 60 % según la normativa vigente. Es esencial destacar que la implementación de este

sistema permitirá garantizar la calidad y seguridad de los productos farmacéuticos almacenados, asegurando que los pacientes reciban un tratamiento seguro y eficaz. Se propone la utilización de un bot de la aplicación Telegram para el monitoreo remoto de los frigoríficos, el responsable podrá consultar la temperatura y humedad en cualquier momento siempre y cuando cuente con una conexión a internet.

Además, se pretende una autonomía de al menos 24 hs en caso de que se corte la energía eléctrica, para llevar a cabo esta propuesta se realiza en primer lugar una estimación de consumo y posteriormente ensayos experimentales.

El sistema diseñado debe ser fácilmente escalable y sencillo de reproducir, en el caso de que se requiera usarlo en otras farmacias y/o otros ámbitos.



## Capítulo 2

# Marco teórico

### 2.1. Consideraciones Generales

En el presente proyecto tiene se propone diseñar e implementar un sistema para el monitoreo de temperatura y humedad relativa de los productos farmacéuticos almacenados en los equipos de refrigeración de las distintas sucursales de la SMAUNaM, desde el momento de su recepción hasta su entrega al público. Esta metodología permitirá garantizar que los productos farmacéuticos se mantengan en las condiciones óptimas de calidad, seguridad y efectividad para las que fueron fabricados, evitando así posibles pérdidas o daños que afecten la salud de los usuarios.

Hasta el momento, las farmacias disponen de equipos de refrigeración convencionales de uso doméstico para almacenar productos farmacéuticos que requieren condiciones de temperatura controlada. La mayoría de estos equipos cuentan con sistemas de control de temperatura basados en el principio de encendido y apagado (ON-OFF), que regulan la temperatura interna del equipo a valores que se adecuan a los rangos establecidos para el almacenamiento de los productos farmacéuticos en estado de refrigeración. Sin embargo, estos equipos no cuentan con un sistema de monitoreo y registro de la temperatura interna, lo que impide al personal conocer el valor real de la misma y detectar posibles fallas o desviaciones para tomar las medidas correctivas de manera oportuna y evitar que se afecte la calidad y seguridad de los medicamentos.

A continuación, se detalla una descripción general del principio de funcionamiento del sistema de monitoreo de temperatura y humedad que se llevará a cabo en este proyecto basados en tecnologías IoT (Internet of Things) para obtener la información del estado de los equipos de refrigeración en forma remota a través de aplicación de mensajería móvil “Telegram”. Se describen los requerimientos de usuario definidos de acuerdo a las normas y especificaciones vigentes para el almacenamiento de medicamentos de productos farmacéuticos. Se realiza un análisis de los elementos y componentes a utilizar en el proyecto, entre los cuales se encuentran los sensores utilizados para medir las variables de interés; el microcontrolador donde se ejecutará el software que se encargará de registrar periódicamente los valores dados por los sensores, visualización y transmisión de datos y accionar los distintos avisos y alarmas en caso de anomalías del proceso; componentes para el sistema de alarmas e interfaz de usuario; elementos para la fuente de energía de respaldo mediante el uso de baterías Li-Ion; también se describen las características de la fuente de alimentación para proveer la energía necesaria para el fun-

cionamiento del sistema. Se describen las características y funciones de cada uno de estos componentes, así como su conexión e integración en el sistema.

### 2.1.1. Estructura General

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema de monitoreo, que ofrece una representación visual clara de su estructura y funcionalidad. En el centro del sistema se encuentra el microcontrolador, actuando como núcleo al controlar y coordinar todas las funciones. Además, se encarga de procesar los datos provenientes de los sensores y enviar las señales apropiadas a los componentes de salida.

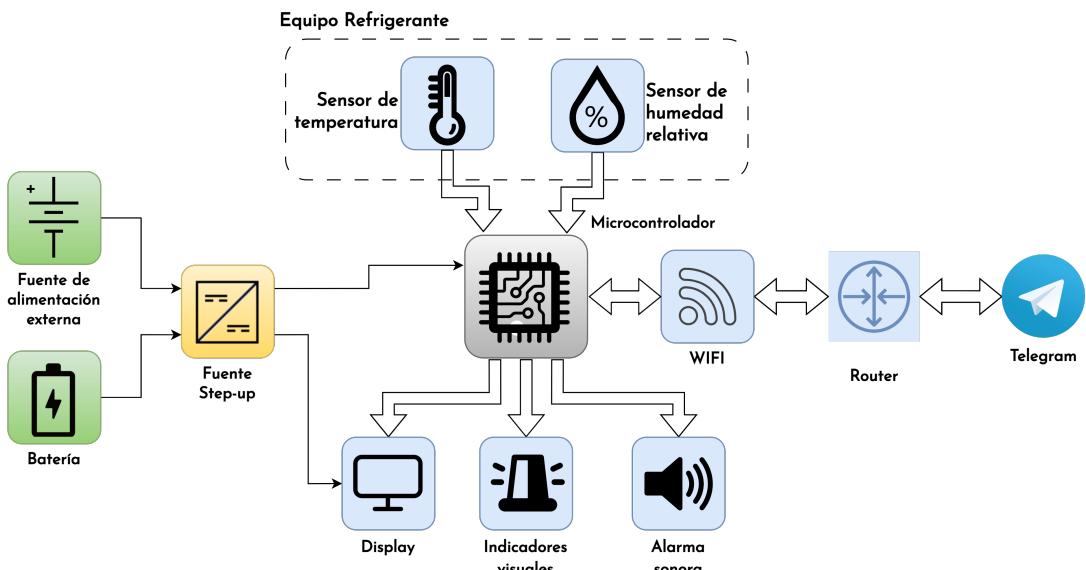


Figura 2.1: Diagrama de bloques general del sistema de monitoreo

Con el objetivo de lograr una autonomía prolongada, se emplea una batería junto con un módulo de carga específicamente seleccionado para este propósito. El módulo de carga se encarga de mantener la batería cargada mediante una fuente de alimentación externa. Asimismo, se utiliza una fuente "step up" para elevar el voltaje de la batería a un nivel adecuado que permita alimentar los componentes del sistema, como el microcontrolador y los sensores.

La alimentación externa proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del sistema de monitoreo.

El sistema cuenta con dos sensores de temperatura y humedad que capturan los datos ambientales del recinto interno del frigorífico. Estos sensores envían los datos recolectados al microcontrolador para su posterior procesamiento.

Además, se ha incorporado un display, un componente visual que muestra información relevante del sistema, como la temperatura y humedad actual, así como el estado de la conexión a internet. El

microcontrolador se encarga de enviar los datos procesados al display para que sean visualizados por el usuario.

Además, el sistema incluye varios LEDs informativos que proporcionan información adicional al usuario, como la indicación de la fuente de alimentación utilizada (externa o batería), el estado de la conexión a internet y un LED específico para señalar situaciones de alarma. También se ha implementado un “buzzer” que emite señales sonoras en caso de que se produzca alguna alarma.

Además, se han añadido dos pulsadores que pueden ser utilizados por el usuario. Uno de ellos se emplea para reiniciar el sistema en caso de ser necesario. El otro pulsador, multifunción, tiene dos propósitos: apagar el “buzzer” de alarma en caso de que esté sonando y conectar el microcontrolador a una red WiFi. Cuando el sistema funciona con la batería, este pulsador permite encender el display para mostrar los datos de temperatura y humedad reales durante unos segundos, después de lo cual el display se apaga nuevamente para ahorrar energía y prolongar la autonomía del sistema.

En resumen, el sistema de monitoreo de temperatura y humedad se basa en un microcontrolador como componente central encargado de controlar y coordinar todas las funciones. Los sensores de temperatura y humedad capturan los datos ambientales, los cuales son procesados por el microcontrolador. La información procesada se muestra en el display, mientras que los LEDs informativos brindan indicaciones visuales complementarias, y el “buzzer” usado como indicador sonoro. El suministro de energía necesario para el funcionamiento del sistema se garantiza mediante la alimentación externa y el módulo de carga de la batería.

## 2.2. Definiciones

### 2.2.1. Internet de las cosas

El Internet de las cosas (IoT) se define como un paradigma tecnológico en el que los objetos cotidianos están conectados en red, permitiendo la adquisición y transmisión de datos de forma automatizada. Este enfoque revolucionario se basa en el uso de tecnologías habilitadoras, protocolos de comunicación y aplicaciones que permiten la interconexión de dispositivos físicos equipados con sensores y actuadores<sup>[5]</sup>. El objetivo principal del IoT es crear entornos inteligentes y servicios que se adapten a las necesidades y actividades de las personas, mejorando así la eficiencia y facilitando la automatización de tareas en diversos campos, como el hogar, la industria y la salud<sup>[6]</sup>.

El IoT se basa en la idea de que los objetos físicos pueden convertirse en entidades inteligentes al estar equipados con sensores y actuadores que les permiten interactuar con su entorno. Estos dispositivos, a menudo denominados “dispositivos inteligentes” o “dispositivos IoT”, pueden adquirir datos del entorno, comunicarse entre sí y con sistemas de información externos, y realizar acciones automatizadas basadas en la información recopilada<sup>[7]</sup>.

La implementación del IoT implica el uso de una variedad de tecnologías y protocolos de comunicación. Entre ellos se encuentran tecnologías inalámbricas como Wi-Fi o Bluetooth, que permiten la transferencia eficiente de datos entre los dispositivos y los sistemas de gestión<sup>[5]</sup>. Estas tecnologías habilitadoras son fundamentales para establecer la conectividad y la comunicación fluida entre los dispositivos IoT, lo que a su vez permite la creación de soluciones innovadoras y aplicaciones prácticas en diferentes sectores.

El IoT ha demostrado tener un impacto significativo en diversos campos. Por ejemplo, en el hogar inteligente, los dispositivos IoT pueden controlar la iluminación, la climatización y los electrodomésticos, ofreciendo mayor comodidad y eficiencia energética[7]. En la industria, el IoT ha dado lugar a la creación de fábricas inteligentes en las que los dispositivos y los sistemas se comunican entre sí para optimizar los procesos de producción y mejorar la eficiencia operativa[6]. En el campo de la salud, los dispositivos médicos IoT pueden monitorizar constantemente los signos vitales de los pacientes y enviar alertas en tiempo real a los médicos en caso de anomalías, lo que permite una atención médica más personalizada y oportuna[7].

Sin embargo, la adopción del IoT también plantea desafíos significativos. La gran cantidad de datos generados por los dispositivos IoT requiere estrategias efectivas de almacenamiento, procesamiento y análisis para extraer información valiosa[6]. Además, la seguridad y la privacidad son cuestiones críticas que deben abordarse de manera rigurosa, ya que los dispositivos IoT pueden estar expuestos a amenazas ciberneticas y la recopilación de datos personales plantea preocupaciones sobre la protección de la privacidad[5].

### 2.2.2. Telegram

Telegram es una plataforma de mensajería instantánea en línea que se lanzó en 2013[8]. Es conocida por su enfoque en la seguridad y la privacidad, así como por sus funciones avanzadas y su amplia gama de aplicaciones. A diferencia de otras aplicaciones de mensajería, Telegram permite a los usuarios enviar mensajes cifrados de extremo a extremo y cuenta con funciones como chat en grupo, llamadas de voz y video, canales de difusión y más.

Una de las características más destacadas de Telegram son los bots. Los bots en Telegram son cuentas automatizadas que pueden interactuar con los usuarios y realizar diversas tareas de forma programada[9]. Estos bots pueden ser desarrollados por terceros y se pueden encontrar en el directorio de bots de Telegram.

Los bots en Telegram ofrecen una amplia gama de funcionalidades y se utilizan en diversas áreas. Es una forma eficiente de automatizar tareas, obtener información instantánea y brindar servicios a los usuarios. Los desarrolladores pueden crear sus propios bots utilizando la API de Telegram, lo que permite una amplia personalización y adaptación a las necesidades específicas de cada usuario o empresa.

El desarrollo de bots de Telegram utilizando microcontroladores como el ESP32 o ESP8266 implica la utilización de librerías específicas de Arduino que permiten establecer la comunicación entre el microcontrolador y la API de Telegram. Estas librerías facilitan el envío de datos recolectados por los sensores conectados al microcontrolador y la ejecución de acciones a través de los actuadores del sistema. En los capítulos posteriores de este trabajo se describirá en detalle el uso de estas librerías, proporcionando instrucciones paso a paso sobre cómo integrar el microcontrolador con la plataforma de Telegram y aprovechar sus funcionalidades para desarrollar bots personalizados.

## Capítulo 3

# Selección de componentes

### 3.1. Sensor de Temperatura y Humedad

Para la selección de los sensores utilizados para el registro de las variables de temperatura y humedad del espacio interno de los equipos refrigerantes, se consideraron que estas presenten un adecuado desempeño en las condiciones ambientales especificadas por las normas ANMAT e IRAM las cuales definen que los productos farmacéuticos que se deban almacenar en estado de refrigeración se encuentren dentro de un intervalo de temperatura comprendido entre 2°C y 8°C.

En lo que respecta a las condiciones de humedad relativa, las normativas vigentes en las actualidad no exigen valores específicos del ambiente donde se almacenarán los productos farmacéuticos en estado de refrigeración. Sin embargo, investigaciones realizadas en [3] y [4] demuestran que los medicamentos expuestos a ambientes con una humedad relativa por encima del 75 % presentan una aceleración en su degradación debido a la reacción de los ingredientes activos presentes en estos.

De los sensores digitales que se puedan hallar en el mercado local, no es posible adquirir un sensor que mida solamente valores de humedad relativa, sino que además estos son capaces de medir valores de temperatura. Esta característica los vuelve ideales para esta aplicación ya que facilita la instalación en los equipos refrigerantes ya que es posible obtener los datos del ambiente interior de los equipos mediante una menor cantidad de conexiones.

Una característica que clasifica a estos sensores, es el protocolo de comunicación que utilizan para la transmisión de datos hacia los dispositivos de procesamiento, en este caso, hacia el microcontrolador. Entre los cuales se encuentran:

**One Wire:** Es un protocolo en serie que utiliza una sola línea de datos más una referencia a tierra (GND) para la comunicación. El esquema general se basa en un dispositivo maestro el cual maneja y controla la comunicación con uno o más dispositivos esclavos. Cada dispositivo esclavo posee un número de identificación (ID) única, inalterable y programada de fábrica de 64 bits que es utilizado como dirección al dispositivo en el bus. Esto permite seleccionar individualmente cualquier dispositivo individual entre los muchos que se pueden conectar al mismo cable de bus. Debido a que uno, dos o incluso docenas de dispositivos One Wire pueden compartir un solo bus para las comunicaciones, se utiliza un algoritmo de búsqueda binaria para encontrar cada dispositivo por turno. Una vez hallado el numero de identificación de cada dispositivo, cualquier dispositivo

puede seleccionarse de forma única para la comunicación utilizando ese número de identificación para abordarlo. Por lo general, los dispositivos esclavos One Wire funcionan en un rango de voltaje de 2,8 V a 5,25 V[10].

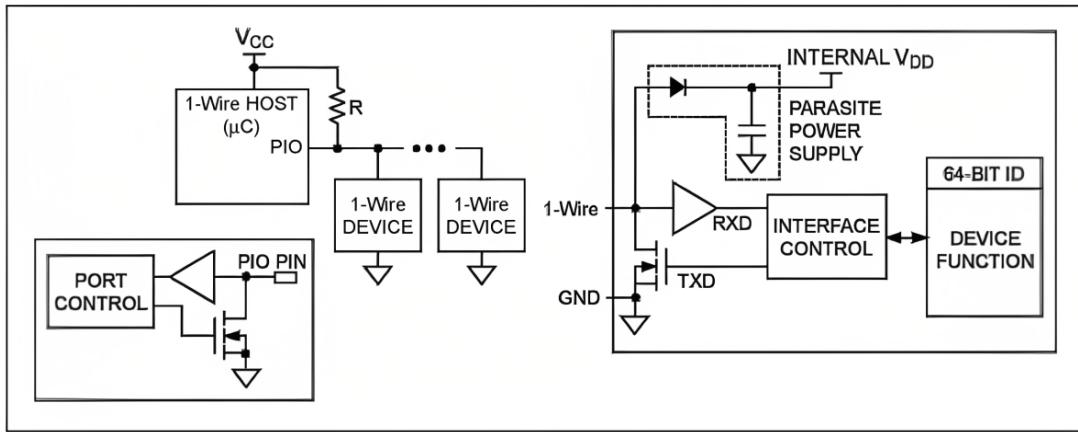


Figura 3.1: Esquema general del protocolo de comunicación One Wire

**I2C:** Es la abreviatura de Inter-IC (*inter integrated circuits*), un tipo de bus diseñado por Philips Semiconductors a principios de los 80s. En este protocolo de comunicación la transmisión de información se realiza por medio de dos cables, la linea de datos en serie (SDA) y la linea de reloj en serie (SCL), por el cual reciben o envían los distintos dispositivos conectados al bus. El bus I2C admite cualquier proceso de fabricación de circuitos integrados (NMOS, CMOS, bipolar). Al igual que el protocolo de comunicación One Wire, cada dispositivo se reconoce por una dirección única, ya sea un microcontrolador, sensores digitales, una memoria o una interfaz de teclado, y puede funcionar como transmisor o receptor, según la función del dispositivo. Además de los transmisores y receptores, los dispositivos también pueden considerarse maestros o esclavos al realizar transferencias de datos. Un maestro es el dispositivo que inicia una transferencia de datos en el bus y genera las señales de reloj para permitir esa transferencia. En ese momento, cualquier dispositivo direccionado se considera esclavo.

Tanto SDA como SCL son líneas bidireccionales, conectadas a un voltaje de suministro positivo a través de una fuente de corriente o una resistencia pull-up (Figura 3.2). Cuando el bus está libre, ambas líneas se encuentran en el estado lógico ALTO. Las etapas de salida de los dispositivos conectados al bus deben poseer una interfaz del tipo *open drain* (drenaje abierto) o *open collector* (colector abierto) para realizar la configuración AND cableada. Los datos en el bus I2C se pueden transferir a velocidades de hasta 100 kbit/s en el modo estándar (*standard-mode*), hasta 400 kbit/s en el modo rápido (*Fast-mode*), hasta 1 Mbit/s en el modo rápido Plus (*Fast-mode Plus*) o hasta a 3,4 Mbit/s en el modo de alta velocidad (*High-speed mode*). Una característica a tener en cuenta para la transferencia de datos es la capacitancia del bus, el cual limita el número de interfaces conectadas al bus.

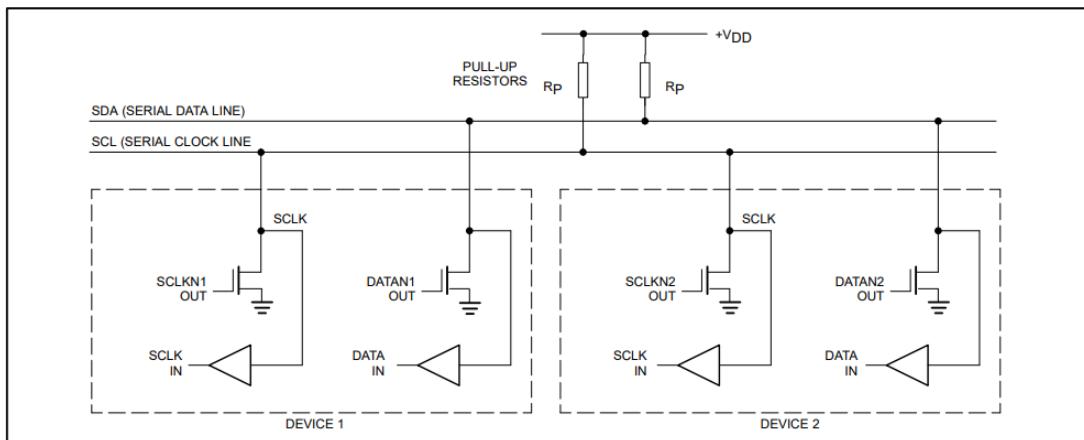


Figura 3.2: Esquema de conexión del protocolo de comunicación I2C

Los protocolos de comunicación mencionados son los que se utilizan comúnmente para conexión de sensores de temperatura y humedad con microcontroladores. Ambos protocolos tienen ventajas y desventajas que se deben considerar a la hora de seleccionar los sensores adecuados para cada aplicación. A continuación, se presentan los criterios de selección de sensores de temperatura y humedad basados en las características técnicas, el costo y la disponibilidad de los mismos[11].

### Criterios de selección

De los diferentes sensores disponibles en el mercado que cumplen con el objetivo planteado, se realizó un análisis comparativo evaluando sus especificaciones técnicas y su adaptabilidad al entorno donde se instalarán. En lo que respecta a sus características de medición, se tuvieron en cuenta las siguientes parámetros:

- **Precisión de medición:** La precisión es una especificación importante que indica la diferencia máxima entre el valor medido por el sensor y el valor real de la variable física que se busca medir. Sin embargo, la precisión no es constante en todo el rango de medición, sino que depende de las condiciones específicas en las que se realiza la medición. Por ello, los fabricantes proporcionan valores de precisión para distintas condiciones específicas. En este caso, se examina su rendimiento en el intervalo de temperatura de 0 °C a 10 °C, siguiendo las normas establecidas para el almacenamiento de productos farmacéuticos.
- **Rango de medición:** Este parámetro indica los límites máximos y mínimos que puede soportar el sensor sin alterar sus condiciones de funcionamiento. Este valor es proporcionado por el fabricante y garantiza la fiabilidad de las mediciones realizadas por el sensor.
- **Resolución:** La resolución describe los incrementos más pequeños de estímulo que se pueden detectar. Cuando un estímulo varía continuamente en el rango, las señales de salida de algunos sensores no serán perfectamente uniformes, incluso en condiciones sin ruido. En el caso de los

sensores de formato de salida digital, la resolución viene dada por el número de bits en la palabra de datos.

- **Corriente de operación:** Este valor permite conocer el rendimiento energético de los sensores en las distintas condiciones de funcionamiento durante el proceso de adquisición de datos. Se evalúan tres valores de corriente:

- Durante la conversión: Valor donde se presenta el máximo de corriente de consumo, en la cual se realiza el muestreo y se procede a la cuantización de la variable física a un valor digital.
- Media: Valor medio de la corriente de consumo durante un periodo de conversión.
- Stand-by: Corriente de consumo del dispositivo mientras se encuentra en suspensión.

Los valores de corriente de consumo de estos sensores de temperatura y humedad relativa son importantes para evaluar la compatibilidad eléctrica con los puertos de salida del microcontrolador que los alimenta. Asimismo, estos valores permiten estimar la capacidad de la batería requerida para garantizar una autonomía de funcionamiento de 24 horas, que es el objetivo del proyecto.

- **Tensión de operación:** Este valor debe ser compatible con los niveles de tensión lógica que emiten los puertos de salida del microcontrolador. De esta manera, se asegura una correcta comunicación entre los dispositivos y se evitan posibles daños por sobretensión o cortocircuito.

Sensor	Precisión (0-10°C)			Rango de medición	Resolución
	Mín	Típico	Máx		
DHT11	-	±5 %RH	-	20 - 90 %RH	1 %RH
DHT22	-	±2 %RH (25°C)	-	10 - 90 %RH	0,1 %RH
AHT15	±4 %RH	-	±6 %RH	0 -100 %RH	0,024 %RH
AHT10	±4 %RH	-	±6 %RH	0 -100 %RH	0,024 %RH
AHT20	±3 %RH	-	±5 %RH	0 - 80 %RH	0,024 %RH
HS3004	-	±3.5 (25°C)	±4.5 (25°C)	20 - 80 %RH	0,01 %RH
SHT10	-	±4.5 %RH (25°C)	-	0-80 %RH	0,05 %RH
SHT85	±1,5 %RH	-	±2 %RH	20-80 %RH	0,01 %RH

Tabla 3.1: Desempeño de los sensores como sensores de humedad relativa

Sensor	Precisión (0-10°C)			Rango de medición	Resolución
	Mín	Típico	Máx		
DHT11	-	±2 °C		0 - 50 °C	1 °C
DHT22	-	±0,5 °C	±1 °C	-40 - 80 °C	0,1 °C
AHT15	±0,3 °C	-	±0,5 °C	-40 - 85 °C	0,3 °C
AHT10	±0,3 °C	-	±0,5 °C	-40 - 85 °C	0,01 °C
AHT20	±0,3 °C	-	±0,5 °C	-40 - 85 °C	0,01 °C
HS3004	±0,3 °C	-	±0,5 °C	-40 - 125 °C	0,01 °C
SHT10	±1 °C	-	±1,25 °C	-40 - 123,8 °C	0,01 °C
SHT85	±0,1 °C	-	±0,2 °C	-40 - 105 °C	0,01 °C

Tabla 3.2: Desempeño de los sensores como sensores de temperatura

Sensor	Comunicación	Imax			Vmax
		Durante conversión	Media	Stand-by	
DHT11	One Wire	0,5 - 2,5 mA	0,2 - 1 mA	100 - 150 µA	3,3 - 5,5 V
DHT22	One wire	500 µA	300 µA	10 - 15 µA	3,3 - 5,5 V
AHT15	I2C	23 µA	-	0,25 µA	1,8 - 3,6 V
AHT10	I2C	980 uA	-	0,25 µA	2,2 - 5,5 V
AHT20	I2C	980 µA	-	0,25 µA	2,2 - 5,5 V
HS3004	I2C	16,9 µA	24,4 µA	0,6 µA	1,8 - 5,5 V
SHT10	I2C	550 µA	28 µA	0,3 µA	2,4 - 5,5 V
SHT85	I2C	600-1500 µA	1,7 µA	0,2 µA	2,15 - 5,5 V

Tabla 3.3: Características técnicas de los sensores de temperatura y humedad relativa

En base a los valores recolectados de los diferentes sensores presentados en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 se determinó la selección del sensor AHT10 dado por el fabricante ASAIR.

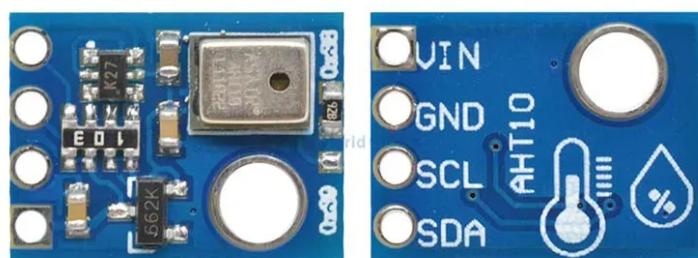


Figura 3.3: Sensor digital de temperatura y humedad relativa AHT10

En base a la información expuesta anteriormente, se observa que este sensor presenta una alta precisión, bajo consumo y accesibilidad en comparación a los restantes sensores disponibles en el mercado.

Según la información consultada, este sensor tiene un error máximo de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  a  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y de  $\pm 4\% \text{RH}$  a  $\pm 6\% \text{RH}$  en el rango de temperatura de operación de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , lo que lo hace adecuado para las condiciones ambientales donde se utilizará. Además, como se indica en la Tabla 3.3, su corriente de consumo es de  $980\ \mu\text{A}$  durante la conversión y de  $0,25\ \mu\text{A}$  en el modo de suspensión, logrando tener un buen desempeño de eficiencia durante su operación. Otra de las ventajas que ofrece este sensor es que dispone de dos direcciones para la comunicación I2C con el microcontrolador. Esto significa que es posible el manejo de dos sensores del tipo AHT10 por medio del mismo bus, permitiendo optimizar la cantidad de pines utilizados por el microcontrolador y simplificar el diseño del hardware al evitar el uso de componentes o circuito especiales adicionales como, por ejemplo, comutadores de direcciones. Por otro lado, también se tuvieron en cuenta cuestiones de disponibilidad y precio de los mismos en el mercado, razón por la cual fueron descartados los sensores con mejores prestaciones que el AHT10, tales como el AHT15 y HS3004.

### 3.2. Interfaz de usuario: Display

Entre una de las mejoras a realizar en el rediseño del sistema de monitoreo consiste en la implementación de una interfaz de usuario en el lugar donde será instalado el sistema. De esta manera, se logra una segunda opción para el acceso de datos de los equipos refrigerantes a monitorear en forma local, que funcionará de manera complementaria a las consultas remotas a través del servidor de Telegram. Así, se garantiza una mayor fiabilidad y seguridad del sistema, al asegurar el conocimiento de los parámetros de funcionamiento de los equipos en todo momento.

Para la selección, se enfatizó en la búsqueda de alternativas que optimicen la cantidad de pines de E/S del microcontrolador para lograr un mejor uso de los GPIO en otros periféricos. Por ello, se opta el uso de displays que dispongan del protocolo I2C para la comunicación con el uC, que es el mismo que se emplea para la comunicación con los sensores de humedad y temperatura. Así, es posible realizar el envío y recepción de datos por parte del display y sensores, respectivamente, utilizando solamente dos GPIOs del uC.

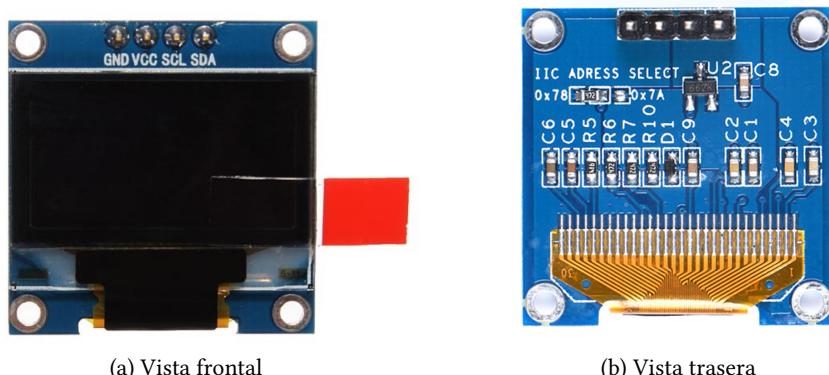
Entre las opciones disponibles en el mercado, se encuentran:

- **LCD 16x2:** Esta pantalla utiliza la tecnología LCD (*Liquid Crystal Display*) alfanumérica monocromática, que permite mostrar caracteres alfanuméricos en una matriz de segmentos. La resolución de la pantalla es de 2 filas por 16 caracteres, y cuenta con el controlador HD44780[12] que procesa la información y genera los caracteres en la pantalla. El controlador tiene una memoria RAM interna de 80 bytes, suficiente para almacenar y retener los 32 caracteres que se pueden mostrar en la pantalla. Para comunicarse con el microcontrolador, se usa un módulo PCF8574[13] que es un expansor remoto para el bus I2C.
- **OLED 128x64:** Esta pantalla utiliza la tecnología OLED (*Organic Light-Emitting Diode*), que consiste en láminas de materiales orgánicos que emiten luz al recibir electricidad. Esto permite que la pantalla sea más compacta, delgada y eficiente en términos de energía, ya que no necesita retroiluminación. La pantalla tiene una resolución de 128x64 píxeles, lo que facilita la generación de gráficos y caracteres. El controlador SSD1306[14] es el encargado de gestionar la comunicación



Figura 3.4: LCD de 16x2 en conjunto con el módulo de comunicación I2C (PCF8574)

con la pantalla mediante las interfaces I2C o SPI. También controla el contraste variable para optimizar el rendimiento. El controlador SSD1306 dispone de una memoria RAM gráfica (GDDRAM) de 1 KB, que se divide en 8 páginas de 128x64 bits cada una.



(a) Vista frontal

(b) Vista trasera

Figura 3.5: Display OLED de 128x64 píxeles

En la Tabla 3.4 se presenta una comparativa de características físicas y eléctricas de las opciones de display mencionadas.

A partir de los datos presentados, se determina el uso de la pantalla OLED de 128x64 píxeles para mostrar la información del proyecto. Esta elección se basa en la facilidad y flexibilidad de diseño de pantallas o páginas que ofrece la tecnología OLED, que permite crear interfaces gráficas más atractivas y personalizadas.

Además, las pantallas OLED tienen una mejor calidad de imagen, con mayor contraste, brillo y ángulo de visión que las LCD. Además, las pantallas OLED son más delgadas y ligeras, lo que las hace ideales para aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos. A pesar de que las pantallas

Display	Tipo	Dimensiones (Área activa)	Interfaz	Tensión de alimentación			Corriente de alimentación		
				Mín	Típico	Máx	Mín	Típico	Máx
CFAH1602A-AGB-JP[15]	LCD	56.20 x 11.5 (mm)	I2C	4,5 V	-	5,5 V	-	1,2 mA	-
WEA012864D-03[16]	OLED	21.74 x 10.86 (mm)	I2C	2,8 V	3,3 V	5,2 V	-	12 mA	20 mA

Tabla 3.4: Tabla comparativa de las características físicas y eléctricas de los display LCD y OLED

OLED presentan algunas desventajas con respecto a las LCD en cuanto al consumo eléctrico, la vida útil y el tamaño del área activa, se considera que los beneficios superan a los inconvenientes, pudiendo mitigar estos aspectos con un diseño adecuado y una gestión eficiente del sistema.

Por lo tanto, se concluye que la pantalla OLED de 128x64 píxeles es una opción adecuada y ventajosa para este trabajo.

### 3.3. Microcontrolador

El adecuado funcionamiento del sistema de monitoreo depende en gran medida del microcontrolador, el cual cumple un papel fundamental en la coordinación y sincronización de las diversas partes y elementos del sistema. Su tarea primordial consiste en recibir y procesar los datos pertinentes para llevar a cabo las tareas correspondientes de manera eficiente y efectiva, tales como el muestreo de temperatura y humedad relativa mediante los sensores, atender a las distintas consultas y acciones de los usuarios a través de Telegram, accionamiento de alarmas, entre otros. De esta manera, el microcontrolador se desempeña como el núcleo central del sistema, asegurando la integridad y la armonía en la ejecución de las funciones requeridas.

#### 3.3.1. Criterios de selección

Al seleccionar un microcontrolador para un sistema de monitoreo de temperatura y humedad de freezers, es fundamental considerar los siguientes puntos claves:

#### Disponibilidad de puertos

En base a los selección de los componentes realizada, el microcontrolador debe disponer de suficientes entradas/salidas para la conexión de los diferentes componentes. Dados los alcances y objetivos del proyecto, el microcontrolador debe ser capaz de albergar los elementos presentados en la Tabla 3.5.

Componentes	Cantidad
Sensor de temperatura y humedad (AHT10)	2
Sensor de Apertura (Reed Switch)	2
Display (OLED 128x64 píxeles)	1
LEDs	2
Buzzer	1
Pulsador	1

Tabla 3.5: Componentes seleccionados utilizados en el sistema

Tanto el display como los sensores de temperatura y humedad utilizados, poseen conexión con el microcontrolador mediante una interfaz por el protocolo de comunicación I2C. Como se mencionó anteriormente, este protocolo tiene como ventaja permitir la conexión de varios dispositivos en un mismo bus, reduciendo el número de pines de entradas y salidas digitales requeridos. De manera que estos 3 elementos hacen uso de solamente de 2 pines de entradas y salidas digitales del microcontrolador. Además, se requiere de una entrada digital adicional para realizar un seguimiento de la presencia de la fuente de alimentación del sistema. También, se requiere que el microcontrolador posea un conversor analógico-digital (ADC) para conocer el estado de la batería, utilizado como energía de reserva ante la ausencia de la fuente de alimentación.

En total, el microcontrolador debe disponer al menos de 9 pines de entradas y salidas digitales y un pin entrada analógica.

### Requerimientos de conectividad

En cuanto a los requisitos de conectividad, es fundamental que el sistema de monitoreo sea capaz de atender de forma remota las solicitudes enviadas por los usuarios a través del servidor de Telegram. Para lograr esto, se requiere que el microcontrolador cuente con una conexión WiFi que permita la transmisión de datos a través de Internet de manera bidireccional. A través de esta conexión, el microcontrolador puede enviar los datos actualizados de temperatura y humedad, y recibir las solicitudes y comandos enviados por los usuarios en tiempo real, desde cualquier lugar.

### Requerimientos Energéticos

En cuanto a los requisitos energéticos, es fundamental que el microcontrolador cumpla con un bajo consumo de energía para lograr la autonomía deseada de 24 horas, ya que el sistema de monitoreo utiliza un sistema de reserva basado en batería. El objetivo principal es garantizar que el microcontrolador demande un consumo lo suficientemente bajo para optimizar la eficiencia del sistema y extender la duración de la batería. Esto es importante dado que se busca lograr una autonomía de 24 horas antes de realizar una nueva recarga. Además, se busca aprovechar al máximo la energía disponible mediante la implementación de modos de funcionamiento de bajo consumo, también conocidos como modos de suspensión, durante los períodos de baja exigencia. Estos modos permiten reducir el consumo energético del microcontrolador cuando no se requiere un procesamiento activo, contribuyendo así a prolongar

la autonomía del sistema. La opción de alternar entre modos de bajo consumo y el funcionamiento con la energía de reserva proporcionará una gestión eficiente de la energía, priorizando la duración de la batería y optimizando su uso en momentos críticos.

### 3.3.2. Opciones de microcontrolador

En el proceso de selección de un microcontrolador se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda en el ámbito local/nacional con el objetivo de identificar las opciones disponibles en el mercado. Cabe destacar que dentro de los criterios de búsqueda, se priorizó disponibilidad de conectividad WiFi, sin embargo, se encontró que las opciones que cumplían con este requisito eran escasas. Tras un análisis minucioso, se encontraron dos empresas destacadas en el mercado de microcontroladores con conectividad WiFi, las cuales cumplen con los requisitos y ofrecen soluciones adecuadas para el sistema de monitoreo. Estas empresas son Arduino y Espressif, cuyas opciones se presentan en la Tabla 3.6.

	ESP8266	ESP8285	ESP32	Arduino MKR WiFi 1010
Conexión inalámbrica	Wi-Fi (802.11n 2.4 GHz, 72.2 Mbps)	Wi-Fi (802.11n 2.4 GHz, 72.2 Mbps)	Wi-Fi (802.11n 2.4 GHz, 150 Mbps)/ Bluetooth	Wi-Fi (802.11n 2.4 GHz, 72 Mbps)/ Bluetooth
Memoria SRAM	160 KB	5 KB	520 KB	32 KB
Memoria FLASH	De 512 KB a 4 MB	1 MB	4 MB	256 KB
Periféricos	UART/SDIO/ SPI/I2C/I2S/ IR Remote Control/ GPIO/ADC/PWM/ LED Light & Button	UART/SDIO/ SPI/I2C/I2S/ IR Remote Control/ GPIO/ADC/PWM/ LED Light & Button	UART/SDIO/SPI/ I2C/I2S/CAN bus/ IR Remote Control/ GPIO/ADC/DAC/ PWM/LED Light & Button	UART/SDIO/SPI/ LIN/I2C/I2S/ IR Remote Control/ DMA/ADC/PWM/ LED Light & Button
GPIO	17	17	34	15
Núcleos	1	1	2	1
ADC	10 bits	10 bits	12 bits	12 bits
Tensión de alimentación	2,5 V- 3,6 V	2,7 V - 3,6 V	2,3 V - 3,6 V	5V
Corriente mínima en suspensión	20 uA	20 uA	5 uA	

Tabla 3.6: Comparación de los distintos microcontroladores disponibles en el mercado

El Arduino MKR WiFi 1010[17] es una placa de desarrollo que cuenta con el SAMD21G18A cuyo procesador principal es un ARM Cortex M0+ que funciona a una frecuencia de hasta 48 MHz. La placa ofrece conectividad WiFi y Bluetooth gracias al integrado Dual Core Tensilica LX6 CPU, el cual opera a una frecuencia de hasta 240 MHz. La mayoría de los pines del Arduino MKR WiFi 1010 están conectados a los encabezados externos, sin embargo, algunos están reservados para la comunicación interna con el módulo de comunicación y los periféricos internos SPI e I2C.

Las tres opciones de Espressif presentadas son del tipo SOC (Systems on Chip) basados en WiFi y todos poseen un procesador de 32 bits.

El ESP8266[18] cuenta con el procesador Xtensa Single-core 32-bit L106 de un solo núcleo que trabaja con una frecuencia de reloj de 160 MHz y una memoria SRAM en chip. Cuenta con la cantidad de 17 GPIO, de las que algunos son capaces de soportar los principales buses de comunicación (SPI, I2C, UART).

El ESP8285[19] es la continuación del ESP8266. La gran diferencia es que incorpora una memoria Flash de 1MB integrada dentro del propio chip. El ESP8266 no dispone de esta memoria y necesita de un módulo externo para almacenar los programas.

En el caso del ESP32 cuenta con una CPU Xtensa Dual-Core 32-bit LX6, el cual se trata de un procesador de doble núcleo, los cuales se pueden controlar individualmente, que trabajan con una frecuencia de reloj ajustable de 80 MHz a 240 MHz. Además, cuenta con un coprocesador que es utilizado para el monitoreo de los distintos periféricos para despertar a la CPU cuando se encuentra en un modo de bajo consumo. Integra un rico conjunto de periféricos, que van desde sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C.

El ESP32[20] soporta una velocidad de datos de hasta 150 Mbps, y una potencia de salida de 20,5 dBm en la antena para asegurar el más amplio rango físico.

Luego de una evaluación de las distintas opciones, se opta por utilizar el microcontrolador ESP8266 para el sistema de monitoreo. Aunque existen alternativas más potentes y avanzadas, se ha determinado que el ESP8266 es adecuado para llevar a cabo el proyecto en cuestión. Este controlador cuenta con características y funcionalidades suficientes para realizar las tareas requeridas en el sistema de monitoreo de manera eficiente. Su capacidad de proporcionar una conexión estable a través de WiFi y su compatibilidad con diversas librerías y plataformas de desarrollo hacen posible la transmisión de datos y la interacción con el servidor de Telegram de manera satisfactoria.

Otro de los factores clave en la elección del ESP8266 es su costo asequible en comparación con las alternativas evaluadas. El ESP8266 ofrece una relación costo-eficiencia favorable, lo cual es especialmente relevante en proyectos con restricciones presupuestarias. Al optar por el ESP8266, se logra una reducción significativa en los costos sin comprometer la funcionalidad y el rendimiento del sistema de monitoreo.

### 3.4. Fuente Step-up

El sistema se alimenta mediante una fuente Step-up que eleva la tensión de la batería de reserva. Esta fuente es necesaria por las características de la placa de desarrollo ESP8266 NodeMCU v.3, que incorpora un regulador de voltaje de 3,3 V para el microcontrolador ESP8266. El regulador requiere una tensión de entrada al menos 1 V superior a la de salida para funcionar correctamente. Como la batería de Li-Ion solo proporciona un máximo de 4,2 V al finalizar la carga, no es suficiente para el regulador. La fuente Step-up también garantiza una tensión constante para los componentes del sistema, evitando las variaciones de la batería durante la descarga hasta que el circuito de protección la desconecta al llegar a 3 V.

Como nivel de voltaje constante se establece 5 V, que es un valor estándar en muchas aplicaciones. La condición para la selección de la fuente Step-up es que sea capaz de elevar la tensión del valor mínimo de voltaje de la batería (3 V) al valor de tensión de voltaje constante mencionado. El que cumple con estas condiciones es el circuito integrado MT3608[21], cuyos parámetros principales se presentan en la Tabla 3.7. La característica de este integrado es que es capaz de regular desde un voltaje mínimo de entrada de 2 V hasta un voltaje máximo de salida de 24 V y una corriente máxima de salida de 2 A. También exhibe características de buen rendimiento, logrando una eficiencia máxima de hasta 97 %, aunque este valor disminuye a medida que la corriente de salida aumenta.

Parámetros	MIN	TYP	MAX	Unidad
Voltaje de entrada	2	-	24	V
Voltaje de bloqueo	-	-	1,98	V
Frecuencia de conmutación	-	1,2	-	MHz
Ciclo útil máximo	90	-	-	%
Voltaje de retroalimentación	0,588	0,6	0,612	V
Corriente límite de conmutación	-	4	-	A
Resistencia de conducción	-	80	150	mΩ

Tabla 3.7: Parámetros principales del MT3608

Se opta por utilizar este circuito integrado en su formato comercial, el cual viene incorporado a un PCB con los distintos componentes necesarios para formar una fuente Step-up. El esquemático y la lista de componentes se muestran en la Figura 3.6 y la Tabla 3.8, respectivamente.

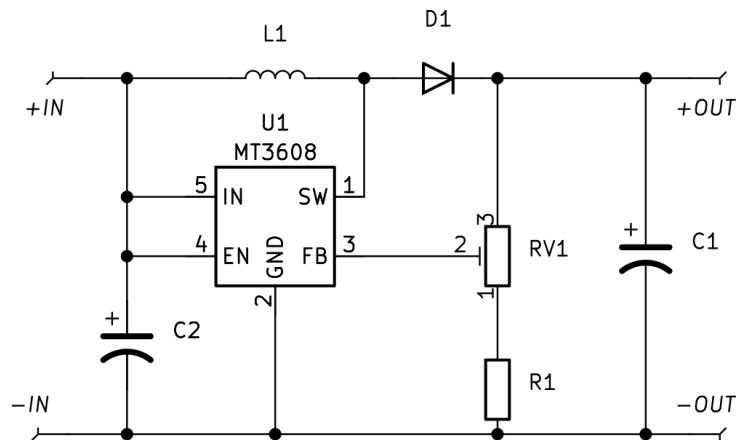


Figura 3.6: Esquemático de la fuente Step-up

## 3.5. Sistema de energía de reserva

### 3.5.1. Batería

#### Selección de la batería

Las baterías son el elemento clave de las fuentes de energía de sistemas electrónicos autónomos, y seleccionar un sistema de baterías adecuado para la aplicación del monitoreo de productos farmacéuticos, lo vuelve un factor importante en el proceso del diseño. Para ello, se debe considerar tanto el tipo de batería como el circuito de control de gestión de carga. La duración de la batería dependerá de la eficiencia energética del sistema y de la tecnología de la batería. Por lo tanto, se deben optimizar ambos aspectos para lograr un mayor rendimiento y fiabilidad. Para la selección adecuada de la batería, los atributos importantes a tener en cuenta son:

- Densidad de energía
- Ciclos de carga/descarga
- Capacidad

Las tecnologías empleadas en las baterías presentan limitaciones para combinar todas estas características de forma óptima, por lo que se requiere establecer un equilibrio adecuado entre ellas.

Las baterías de NiMH (níquel-hidruro metálico) y las baterías de Li-Ion (Ion de Litio), cuyas características se presentan en la Tabla 3.9, son las químicas de batería más populares que mejor se desempeñan en aplicaciones que requieren fuentes de alimentación de respaldo[22].

1. **NiMH:** Se consideran una versión mejorada de las baterías de NiCd (Níquel-Cadmio) que proporcionan una mayor densidad de energía y un material más amigable con el medio ambiente. Tanto las baterías de NiMH como las de NiCd tienen una alta tasa de autodescarga y están sujetas al efecto memoria. Las baterías de NiMH requieren un algoritmo de carga con un diseño más complejo debido al calor que generan durante la carga y la difícil detección de  $-\Delta V/\Delta t$ .
2. **Li-Ion:** Este tipo de baterías tienen ventajas en cuanto a alta densidad de energía, bajo requerimiento de mantenimiento, tasa de autodescarga relativamente baja y mayor voltaje por celda. Los

Componentes	Valor	Etiqueta
Capacitor Electrolítico	22 uF	C1
Capacitor Electrolítico	22 uF	C2
Inductor	22 uF	L1
Diodo	SS34	D1
Resistencia	2,2 kΩ	R1
Resistencia Variable (Trimmer)	100 kΩ	RV1

Tabla 3.8: Componentes de la fuente Step-up

principales inconvenientes de las baterías de iones de litio son el mayor costo inicial y el efecto de envejecimiento. Las baterías de iones de litio envejecen con el tiempo independientemente del uso. Se requiere un circuito de protección para evitar sobrevoltaje durante el ciclo de carga y bajo voltaje durante el ciclo de descarga.

Tabla 3.9: Comparación de baterías Li-Ion y NiMH

	Li-Ion	NiMH
Voltaje nominal [V]	3,6	1,2
Voltaje a circuito abierto [V]	4,2	1,3
Voltaje mínimo [V]	2,8	0,9
Cantidad de ciclos de recarga	1000	800
Efecto de memoria	No	Si
Densidad de energía: Volumen [Wh/L]	210-320	160-230
Densidad de energía: Peso [Wh/kg]	110-130	60-100

La Tabla 3.9 muestra una comparación entre las baterías del tipo Li-Ion y las del tipo NiMH. Se puede apreciar que las baterías de Li-Ion tienen varias ventajas sobre las de NiMH, tanto en términos de rendimiento como de mantenimiento. Mientras que una celda de Li-Ion tiene un voltaje de 3,6 V, se necesitan tres celdas de NiMH para alcanzar el mismo valor. Esto implica que las baterías de Li-Ion ocupan menos espacio y evitan el problema del balanceo entre celdas, que consiste en la pérdida de sincronización entre los voltajes de cada celda debido a las diferencias en la capacidad o la resistencia interna.

Otra desventaja de las baterías de NiMH es que sufren el efecto de memoria, que se produce cuando el voltaje máximo de la batería disminuye después de ciclos de carga incompletos. Esto requiere sistemas de carga precisos y complejos que detecten los cambios reales en el nivel de voltaje y eviten terminar la carga prematuramente. De esta manera, se logra una carga completa y se prolonga la vida útil de la batería. Por el contrario, las baterías de Li-Ion no presentan este efecto y pueden ser cargadas en cualquier momento sin afectar su rendimiento. Esto permite el uso de sistemas de carga más simples y económicos. Por los motivos expuestos anteriormente, se concluye que las baterías de Li-Ion son las más adecuadas para el uso sistemas que requieran bajo peso y larga duración. Por lo tanto, se opta por utilizar este tipo de baterías en el proyecto.

### Cálculo de capacidad

La capacidad de una batería se define por convención internacional como la carga eléctrica en unidades de Ah (Amperios-hora) que se puede extraer de la batería [23]. Cuando la batería realiza procesos de descarga, la expresión general para determinar el valor de capacidad es la siguiente:

$$C = \int_0^t I(t) dt [Ah] \quad (3.1)$$

Los parámetros de descarga que tienen mayor influencia en el valor de la capacidad son:

Componente	Modelo	$I_{max}$ [mA]	Cantidad	Tiempo [h]
Sensor de Temperatura y HR	AHT10	0,980	2	0,15
Sensor de Apertura	ORD324	0,1	2	24
LED WiFi	5 mm Ø	10	1	24
LED Alerta	5 mm Ø	10	1	2
Display OLED	WEA012864D-03	12	1	24
Buzzer	Activo de 5 V	25	1	2
Microcontrolador	ESP8266 (Recepción)	56	1	21,6
	ESP8266 (Transmisión)	170		2,4

Tabla 3.10: Condiciones de funcionamiento del sistema la energía de respaldo

- Corriente de descarga.
- Voltaje límite, es decir, el valor de voltaje donde ocurre el final de la descarga.
- Temperatura

Otros factores que tienen relación para el dimensionamiento de la capacidad pueden ser el estado de carga (SOC), el envejecimiento, los ciclos de descarga, entre otros que, mientras más factores sean considerados mejor será la estimación. En esta ocasión, de manera de simplificar el diseño, se enfocará el cálculo de la capacidad teniendo en cuenta solamente la corriente de carga que demande el sistema.

Para la corriente de descarga se debe especificar el tipo de carga que describa el consumo del sistema. Dado que el sistema se encuentra continuamente ejecutando diversos tipos de tareas, alternando entre procesos de muestreo, secuencias de alarmas y procedimientos de recepción y transmisión de datos de las funciones WIFI, siendo las últimas las que mayor consumo demandan durante el funcionamiento, se puede determinar que el sistema posee períodos de descarga discontinuos aproximado a un perfil de corriente de descarga intermitente. En estos casos, la capacidad necesaria de la batería se puede aproximar con suficiente precisión mediante el valor medio de la corriente de carga.

Para ello se deben establecer las condiciones de funcionamiento de los diferentes componentes durante el lapso de funcionamiento del sistema en el que se encuentre sin conexión a la red eléctrica. Esto se describe en la Tabla 3.10 en el que se tuvo en cuenta la corriente máxima de consumo de los distintos elementos que conforman al sistema y el tiempo de funcionamiento, en horas, durante las veinticuatro horas de autonomía que se busca lograr.

De los valores presentados en la Tabla 3.10, da como resultado una corriente media de 92,52 mA. Sin embargo, este valor no considera las pérdidas asociadas al uso de la fuente Step-up, que eleva el voltaje de la batería a un voltaje de 5 V para energizar el sistema de manera correcta. La eficiencia de esta fuente es de 0,8, debido a la disipación de calor que se produce. Por lo tanto, se debe aplicar un factor de corrección que depende del tiempo, como se muestra en la Figura 3.7. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la capacidad mínima necesaria para lograr una autonomía de veinticuatro horas es de 3893 mAh.

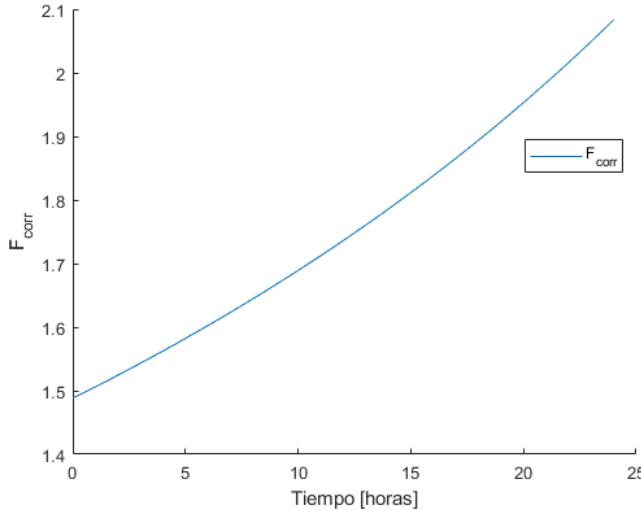


Figura 3.7: Factor de corrección por el uso de la fuente Step-up

### 3.5.2. Circuito de carga

Las baterías de Li-Ion requieren de un algoritmo de carga específico que controle la corriente y la tensión aplicadas durante el proceso de carga, para evitar daños en la estructura interna de las celdas y optimizar su rendimiento. El algoritmo de carga más adecuado para este tipo de baterías es el denominado CC-CV (Corriente constante - Tensión constante) cuyo funcionamiento se ilustra en la Figura 3.8. El TP4056[24] es el circuito integrado elegido para implementar dicho algoritmo de carga de forma automática, protegiendo la batería de sobrecargas, cortocircuitos y sobrecalentamientos.

El proceso de carga se puede dividir en cuatro etapas:

- **Etapa 1 (Carga lenta):** Esta etapa se desarrolla en los momentos que la batería se encuentre profundamente agotada. En el TP4056, cuando la batería presente un voltaje por debajo de 2,9 V, la carga se realiza a una corriente constante de 120 mA.
- **Etapa 2 (Carga rápida):** Superada la tensión mínima de 2,9 V, la corriente hacia la batería aumenta de manera de acelerar el proceso de carga. La corriente de carga máxima dado por el TP4056 es de 1 A, el cual es configurado con la resistencia  $R_{PROG}$  conectado al pin 2 de monitoreo de corriente (Figura 3.9) mediante la siguiente ecuación:

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \quad (3.2)$$

Donde  $V_{PROG} = 1V$ .

- **Etapa 3 (Tensión constante):** En este punto finaliza la carga rápida, y el modo de tensión constante inicia en el momento que la batería alcanza un voltaje de 4,2 V.

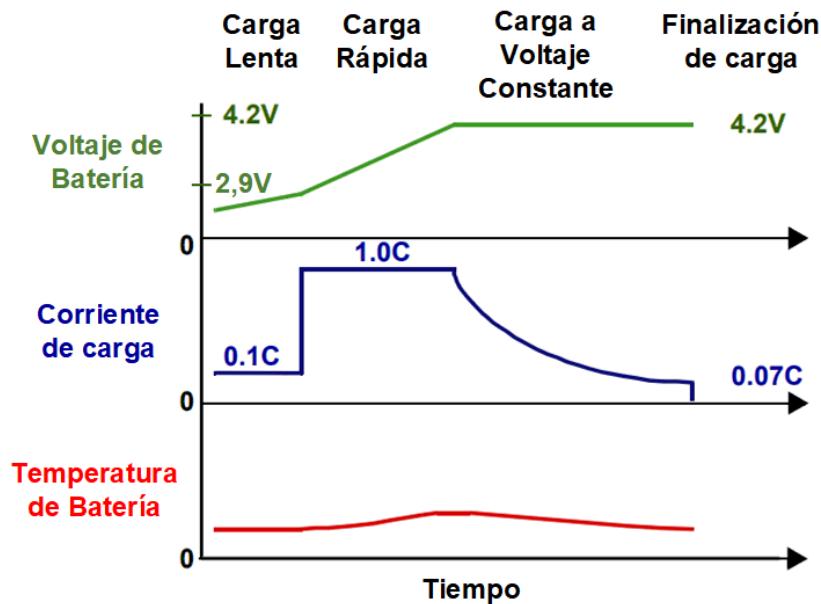


Figura 3.8: Algoritmo de carga para baterías Li-Ion

- **Etapa 4 (Finalización de carga):** Durante la etapa de tensión constante, la corriente disminuye hasta finalizar la carga cuando la corriente de carga se encuentra por debajo de 100 mA.

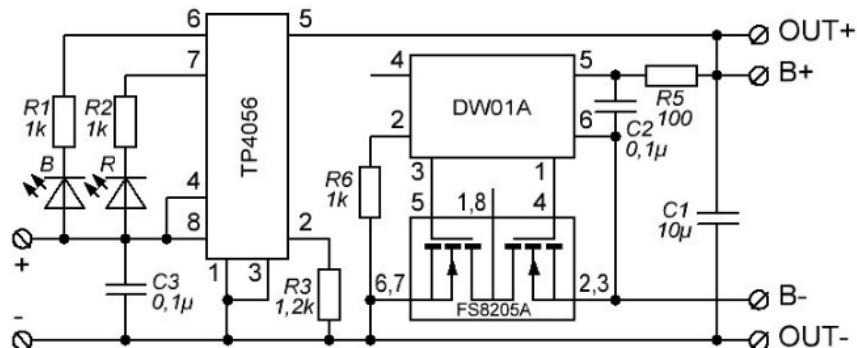


Figura 3.9: Esquemático del circuito de carga para batería Li-Ion

Además, en el circuito de carga se implementa el circuito integrado DW01-P[25] que tiene como propósito principal incorporar protecciones adicionales a las ofrecidas por el TP4056. Las protecciones que ofrece el DW01-P son las siguientes:

- **Protección contra sobrecarga:** Cuando la tensión en la batería excede la tensión de sobrecarga ( $V_{OCP}$ ) por un periodo de retardo de sobrecarga ( $T_{OC}$ ), el proceso de carga es deshabilitada.

Modelo	Voltaje de detección de sobrecarga [ $V_{OCP}$ ] (V)	Voltaje de liberación de sobrecarga [ $V_{OCR}$ ] (V)	Voltaje de detección de sobredescarga [ $V_{ODP}$ ] (V)	Voltaje de liberación de sobredescarga [ $V_{ODR}$ ] (V)
DW01-P	$4,250 \pm 0,050$	$4,050 \pm 0,050$	$2,40 \pm 0,100$	$3,0 \pm 0,100$

Tabla 3.11: Niveles de voltajes de protección del DW01-P

Parámetro	Símbolo	Típico	Máx	Unidad
Tiempo de retardo de sobrecarga	$T_{OC}$	80	200	ms
Tiempo de retardo de sobredescarga	$T_{OD}$	40	100	ms
Tiempo de retardo de sobrecorriente (1)	$T_{OI1}$	10	20	ms
Tiempo de retardo de sobrecorriente (2)	$T_{OI2}$	-	500	us

Tabla 3.12: Tiempo de retardo para la acción de las protecciones del DW01-P

Solamente es rehabilitada en dos situaciones:

1. Cuando la tensión de la batería se encuentra por debajo de la tensión de liberación de sobrecarga ( $V_{OCR}$ )
  2. La tensión de la batería se encuentra por debajo de la tensión de sobrecarga ( $V_{OCP}$ ) y carga eléctrica se encuentra conectada.
- **Protección contra sobredescarga:** Cuando la tensión en la batería se encuentra por debajo de la tensión de sobredescarga ( $V_{ODP}$ ) por un periodo de retardo de sobredescarga ( $T_{OD}$ ), el proceso de descarga es deshabilitada. La habilitación ocurre cuando la tensión de la batería se encuentra por encima de la tensión de sobredescarga de liberación ( $V_{ODR}$ ) durante la carga.
  - **Protección contra sobrecorriente:** La corriente de descarga se encuentra monitoreando continuamente mediante el pin CS (pin 2). Si el voltaje sobre este pin excede la tensión de sobrecorriente de protección ( $V_{OIP}$ ) durante un periodo de retardo de sobrecorriente ( $T_{OI1}$ ), el circuito de protección de sobrecorriente actúa y se deshabilita el proceso de descarga. El sistema vuelve a su operación normal una vez que la impedancia entre los terminales de la batería sea mayor a 500 kΩ. El DW01-P posee dos niveles de tensión para detección de sobrecorriente (0,15 V y 1,35 V) con los respectivos periodos de retardo  $T_{OI1}$  y  $T_{OI2}$ .

El DW01-P tiene dos pines de control (3 y 1 de la Figura 3.9) que permiten habilitar o deshabilitar los MOSFETs encargados de regular los procesos de carga y descarga de la batería. El pin 3 se utiliza para el control del MOSFET de carga y el pin 1 para el control del MOSFET de descarga. Como la protección de sobrecorriente se basa en una tensión de referencia fija que se compara con la caída de tensión en los MOSFETs cuando están en conducción. Esta caída de tensión depende de la resistencia de encendido entre drenaje-surtidor ( $R_{DS(ON)}$ ) de los MOSFETs, que varía según la temperatura y la tensión de puerta. El valor máximo de  $R_{DS(ON)}$  se puede calcular mediante la ecuación:

$$R_{DS(ON)} = \frac{V_{OIP}}{2 * I_T} \quad (3.3)$$

Donde  $I_T$  es el nivel de corriente donde es accionada la protección. Este nivel debe ser adecuado para permitir que los procesos de carga se realicen de forma completa y para aprovechar la batería como fuente de energía de reserva. Por lo tanto, el valor de  $R_{DS(ON)}$  debe ser lo suficientemente bajo. Por esta razón, el circuito de carga incorpora en el esquemático el FS8205A[26], que consiste en un par de MOSFETs de canal N en serie, que tiene como característica principal una baja resistencia  $R_{DS(ON)}$  (32 mΩ para un  $V_{GS} = 2,5V$ ). Haciendo uso de la ecuación 3.3, la el nivel de corriente de protección queda definido en 2,34 A, siendo un valor suficiente para las condiciones mencionadas.



## Capítulo 4

# Diseño de Hardware

En el siguiente capítulo se desarrolla la memoria de cálculos para resistores limitadores de corriente de los LEDs utilizados para indicar información sobre el funcionamiento del sistema, también para el buzzer que brinda una señal sonora de alarma, los resistores de “pull-up” usados para los buses de I2C y demás configuraciones usadas en las distintas partes del sistema, para lograr un funcionamiento óptimo del mismo.

### 4.1. LEDs, buzzer y pulsador

En el caso de los LEDs, suponemos una corriente de funcionamiento de 10 mA y como tensión de alimentación usamos los 5 V ya sea de la alimentación externa o de la batería del sistema. A continuación, se detalla la función de cada componente:

- LED azul: indica que el sistema está siendo alimentado por tensión eléctrica proveniente de la red eléctrica. Lo que implica que no se está usando la energía de la batería. Al estar apagado este LED, se entiende que todo el sistema está siendo alimentado por la batería.
- LED verde: al estar encendido este LED, indica que el microcontrolador está conectado a una red WiFi. Cuando esté en modo configuración, para conectarse a una nueva red WiFi, se produce una intermitencia del LED.
- LED rojo: indica la presencia de una alarma, y seguirá intermitente hasta que se resuelva dicho problema. Actúa en simultáneo con el buzzer.
- Buzzer: es usado como indicador sonoro de alarma. Está encendido hasta que se apague con el pulsador multifunción del gabinete o a través del bot de Telegram.

Cada indicador es activado mediante una salida digital del microcontrolador mediante el uso de transistores BJT implementadas como llaves electrónicas con el fin de disminuir la corriente por parte del microcontrolador y lograr el correcto funcionamiento de los LEDs y el buzzer.

Dado que el manejo de estos periféricos exigen un bajo consumo de corriente (no mayor a 40 mA en el peor de los casos), se opta el uso de transistores BJT-NPN de baja potencia. Además, se decide por

el uso de encapsulados del tipo SMD, al igual que los resistores necesarios para su manipulación, de manera de conseguir optimizar el espacio en la placa de circuito impreso (PCB) y reducir sus dimensiones. En base a lo mencionado, el transistor seleccionado es el BC817-25, que es un BJT del tipo NPN de baja potencia con un encapsulado SOT-23.

Suponiendo la misma tensión y corriente de funcionamiento de los LEDs, los parámetros técnicos de cada componente son:

- LEDs:
  - Tensión de funcionamiento( $V_F$ ): 2,2 V
  - Corriente de funcionamiento ( $I_F$ ): 10 mA
- Buzzer:
  - Corriente de funcionamiento( $I_{buzzer}$ ): 30 mA
- BC817-25:
  - Ganancia mínima( $\beta_{min}$ ): 160
  - Tensión Base-Emisor ( $V_{BE(ON)}$ ): 1,2 V
  - Tensión Colector-Emisor( $V_{CE}$ ): 0,7 V

A continuación se realizan los cálculos de resistores limitadores de corriente y resistores de base para cada LED.

Resistores limitadores de corriente para cada LED:

$$R_{\text{lim}} = \frac{V_{cc} - V_F - V_{CE}}{I_F} = \frac{5V - 2,2V - 0,7V}{10mA} = 210\Omega \quad (4.1)$$

Considerando que los tres LEDs tienen aproximadamente la misma tensión de funcionamiento, el cálculo expresado en la ecuación (4.1) para el resistor limitador es el mismo para los 3 casos. El valor comercial que adoptamos es de  $220\Omega$  y  $1/4W$ .

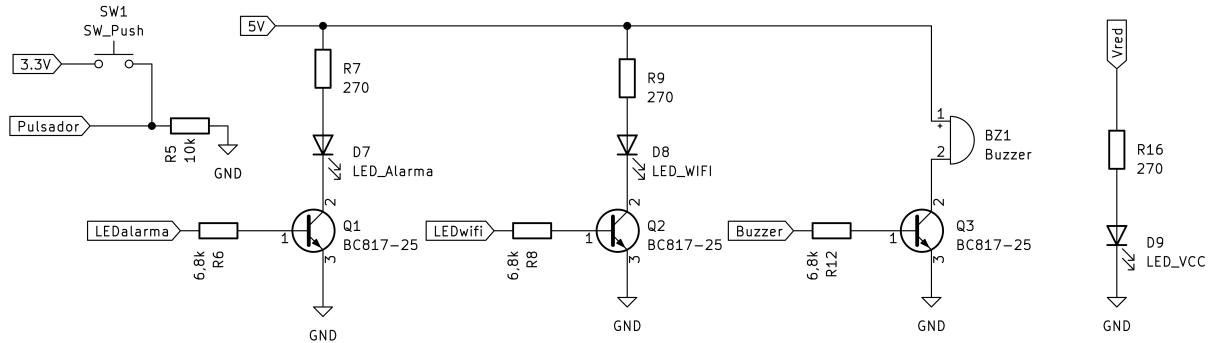
$$I_F = \frac{V_{cc} - V_F - V_{CE}}{R_{\text{lim}}} = \frac{5V - 2,2V - 0,7V}{220\Omega} = 9,54mA \quad (4.2)$$

Al utilizar transistores BJT como “llaves electrónicas”, trabajando en corte y saturación, se procede a calcular la corriente de base para que el transistor trabaje en la zona de saturación, teniendo en cuenta que la corriente de colector es de 9,54mA, calculada en la ecuación(4.2).

$$I_b = 5 \times \frac{I_c}{\beta} = 5 \times \frac{9,54mA}{160} = 298,25\mu A \quad (4.3)$$

Con esta corriente, de la ecuación(4.3), se calcula la resistencia de base.

$$R_b = \frac{V_{OH(\text{mín})} - V_{BE(ON)}}{I_b} = \frac{2,64V - 1,2V}{298,29\mu A} = 4,83k\Omega \quad (4.4)$$

Figura 4.1: Circuito de conexión de LEDs, *buzzer* y pulsador del sistema

A partir del valor teórico calculado, adoptamos un valor comercial de  $6,8\text{k}\Omega$  y  $1/4\text{W}$ , para los resistores de base de los transistores que comandarán a los LEDs rojo y verde. Se utiliza un valor de resistor más elevado para asegurar que en el arranque del microcontrolador haya un estado lógico alto y no se produzca una falla, como lo indica la tabla 6.2.

En el caso de *buzzer*, la corriente máxima que puede consumir es de  $40\text{mA}$ , por lo tanto se debe calcular una resistencia de base acorde a esta carga.

$$I_b = 5 \times \frac{I_c}{\beta} = 5 \times \frac{40\text{mA}}{160} = 1,25\text{mA} \quad (4.5)$$

$$R_b = \frac{V_{OH(\min)} - V_{BE(ON)}}{I_b} = \frac{2,64\text{V} - 1,2\text{V}}{1,25\text{mA}} = 1,15\text{k}\Omega \quad (4.6)$$

Para esta implementación, adoptamos un valor comercial de  $1\text{k}\Omega$  y  $1/4\text{W}$ .

Para esta implementación, se adopta un valor comercial de  $1\text{k}\Omega$  y  $1/4\text{W}$ . En el caso del pulsador, se selecciona un resistor “pull-down” para forzar un estado lógico bajo cuando no esté accionado el pulsador. Los parámetros a tener en cuenta del microcontrolador son:

- Tensión de entrada en bajo máxima ( $V_{IL(max)}$ ):  $0,825\text{V}$
- Corriente de entrada en bajo máxima ( $I_{IL(max)}$ ):  $50\text{nA}$

$$R_{PD(\max)} = \frac{V_{IL(\max)}}{I_{IL(\max)}} = \frac{0,825\text{V}}{50\text{nA}} = 16,5\text{M}\Omega \quad (4.7)$$

Se selecciona un resistor comercial de  $10\text{k}\Omega$  y  $1/4\text{W}$ .

## 4.2. Comunicación I2C

Los dispositivos esclavos que se conectan al bus I2C son dos sensores AHT10 y un display OLED SSD1306. Al emplear el protocolo de comunicación I2C, surgen desafíos relacionados con la transmisión de datos entre el microcontrolador y los sensores debido al aumento de la capacitancia del bus a

medida que su longitud se incrementa. Esta capacitancia provoca un aumento en los tiempos de subida de las señales SDA y SCL, lo que restringe tanto la frecuencia de transmisión como la cantidad de dispositivos conectados al bus. Generalmente, se recomienda un valor máximo de capacitancia de 400 pF para el protocolo I2C a fin de operar con tiempos de subida reducidos y a la frecuencia nominal. Sin embargo, en algunas aplicaciones, el valor máximo de capacitancia se supera. Para afrontar este problema, existen diversas técnicas disponibles. Una de ellas consiste en disminuir la frecuencia de la línea SCL para reducir la velocidad de transmisión de datos. De esta manera, se busca cumplir con los tiempos de retención mínimos de los estados lógicos en alto y bajo de las líneas del bus. Esta técnica resulta favorable, ya que solo requiere modificaciones de software, sin necesidad de alteraciones en el hardware. Para esta aplicación, se ha optado por utilizar resistencias de pull-up de 10 kΩ y una frecuencia de clock ( $f_{SCL}$ ) de 7 kHz, considerando una longitud de 5 metros para el bus I2C. Los ensayos que se realizaron con estas condiciones para probar la fiabilidad de la comunicación están expuestos en el Capítulo 7, sección 7.1.

Además, la ubicación lejana de los sensores conlleva a eventuales problemas de condiciones de sobre-voltaje producto de la inducción electromagnética de fuentes aledañas, tales como motores eléctricos, sobre los cables de los sensores. En estas condiciones de sobre-voltaje, una significativa magnitud de corriente puede conducirse a través del circuito de entradas/salidas digitales del microcontrolador, capaz de causar un daño al dispositivo.

El microcontrolador ESP8266 cuenta, en cada una de sus GPIOs, un circuito de protección interno conformado por diodos de descargas electromagnéticas (ESD), que se caracterizan por poseer una baja caída de voltaje en directa (de 0,4 V a 0,7 V). Las mismas se encuentran conectadas entre los pines de E/S y la tensión de alimentación ( $V_{CC}$ ) y masa (GND) polarizadas en forma inversa durante las condiciones normales de operación. En situaciones donde se presente un sobre-voltaje, los diodos ESD se polarizan en forma directa y conducen la corriente a la fuente de alimentación.

Un inconveniente que se presenta es que los diodos ESD internos poseen una baja corriente de conducción en continua (generalmente de 10 mA) que, en el caso que la corriente sobrepase este valor máximo, la estructura de protección puede llegar a fallar, resultando en el daño del dispositivo. Además, el bus I2C se encuentra alimentado por una fuente lineal que no posee un diseño para operar ante corrientes de fuga como las que serán derivadas por los diodos ESD, lo que representa una aumento en el voltaje de alimentación. Esta condición de sobre-voltaje, no solo resultaría en el daño del microcontrolador, sino también de todos los dispositivos conectados a la fuente de alimentación del sistema.

Para ello se propone el esquema presentado en la Figura 3.2. El uso de diodos Schottky externos permite el enclavamiento del voltaje de entrada ante las situaciones de sobre-voltaje con una mayor capacidad de corriente de falla al evitar conducir la misma sobre los diodos ESD internos del dispositivo. Esto es posible dado por una menor caída de voltaje en directa de los diodos Schottky (generalmente de 0,2 V a 0,4 V). Los resistores en serie a la entrada (R3-R4) limitan la corriente sobre los diodos Schottky durante la condición de sobre-voltaje. Por último, el diodo zener (ZR1) fija el voltaje de alimentación en 3,3 V ante las corrientes derivadas del bus I2C por la polarización en directa de los diodos Schottky D3 y D9.

Para los diodos Schottky se utiliza el BAT42, mientras que para el diodo Zener, se utiliza el 1N5226b. Para determinar el valor de los resistores de protección, se considera un voltaje de entrada de 40 V ante una situación de sobre-voltaje a una corriente del 50 % de la corriente máxima en directa del BAT42.

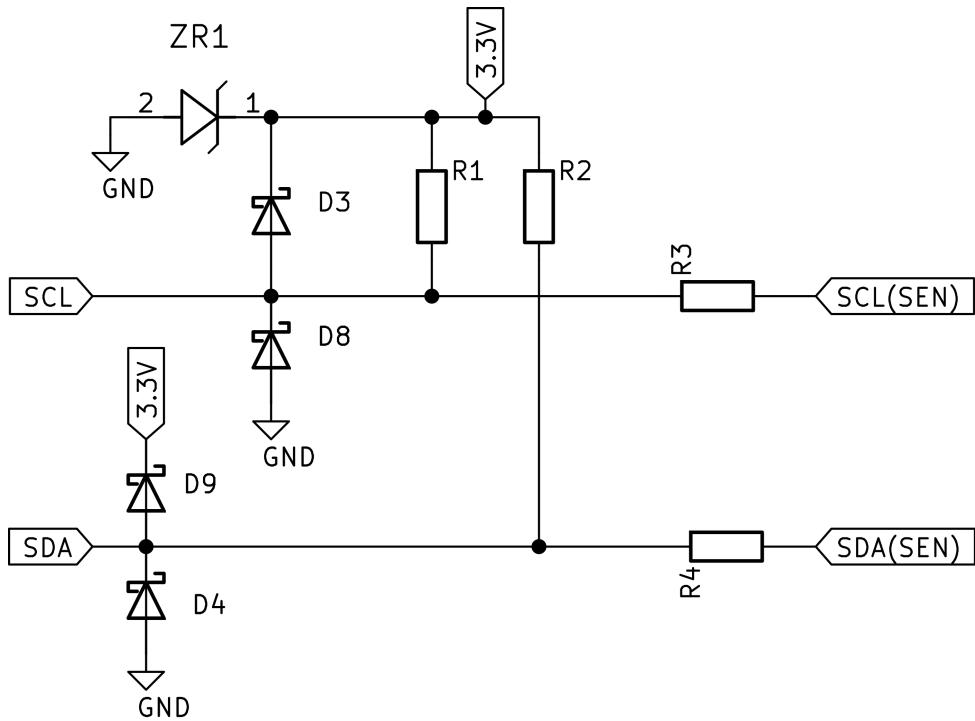


Figura 4.2: Diagrama de conexión I2C

**AGREGAR IMAGEN ILUSTRATIVA CON AHT A COLECTOR ABIERTO Y ESP**

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, el valor de los resistores de protección queda definida por la siguiente expresión:

$$R_{protec} = \frac{V_{IN} - V_{DD} - V_F}{50 \% I_{max}} \quad (4.8)$$

Donde:

- $V_{in}$ : Voltaje a la entrada del bus I2C en condición de sobre-voltaje.
- $V_F$ : Caída de voltaje en directa del BAT42.
- $V_{DD}$ : Voltaje de alimentación del bus I2C.
- $I_{max}$ : Corriente máxima en directa del diodo BAT42.

Aplicando los valores establecidos por la hoja de datos del BAT42 en la expresión 4.8, se obtiene el siguiente resultado:

$$R_{protec} = \frac{40V - 3,3V - 0,4V}{50 \% 200mA} = 363\Omega \quad (4.9)$$

Se selecciona resistores de  $360\ \Omega$ , acorde a la serie de valores E12. El criterio de selección de los resistores pull-up, tanto para la linea SDA como SCL, se basa en asegurar un voltaje por debajo al voltaje máximo que el microcontrolador considere un estado lógico bajo para cuando los sensores AHT10 tomen el mando del bus I2C.

$$R_{pu} \geq \left( \frac{V_{DD} - V_{OL_{AHT}}}{V_{IL_{ESP}} - V_{OL_{AHT}}} - 1 \right) R_{prot} \quad (4.10)$$

Donde:

- $V_{OL_{AHT}}$ : Voltaje de salida máximo en estado bajo del sensor AHT10.
- $V_{IL_{ESP}}$ : Voltaje de entrada máximo donde el ESP8266 considera un estado lógico bajo.

Según la hoja de datos,  $V_{IL_{ESP}}$  es del 25 % del voltaje de alimentación del microcontrolador. Reemplazando de la hoja de datos en la ecuación 4.10, se obtiene el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} R_{pu} &\geq \left( \frac{3,3V - 0,4V}{25\%3,3V - 0,4V} - 1 \right) 360\Omega \\ &\geq 2096,5\Omega \end{aligned} \quad (4.11)$$

El valor obtenido en la ecuación 4.11 indica el valor mínimo del valor del resistor pull-up con el que no ocurran errores de interpretar un estado lógico alto en lugar de un estado lógico bajo por parte del microcontrolador. Para este caso, se selecciona un valor de  $5,6\ k\Omega$  de la serie E12.

### 4.3. Load Sharing

Durante la sección 3.5.2 se detalla el funcionamiento del circuito de carga que se implementa basado en el integrado TP4056 utilizado para el circuito de carga de la batería. Para que el TP4056 finalice automáticamente el ciclo de carga, la corriente debe ser menor al 10 % del valor programado, una vez que se alcanza el voltaje final. En este caso, se programó una corriente máxima de carga de 1A, lo que significa que el umbral de finalización se encuentra por debajo de los 100mA.

Teniendo en cuenta que la corriente de funcionamiento del sistema supera los 100 mA, el circuito de carga interpreta que la batería nunca está completamente cargada y continúa el proceso de carga de manera constante, lo que disminuye la vida útil de la batería.

Para abordar este problema, se ha implementado la configuración de "Load Sharing."º fuente compartida, que permite la sincronización de ambas fuentes mediante el uso de dos diodos. La fuente principal es la alimentación que proviene de la red eléctrica, y en ausencia de esta, el sistema cambia automáticamente a la batería. El término "sincronización" hace referencia a que no se utilizan ambas fuentes simultáneamente, sino que se emplea la fuente principal y, en caso de su falta, la fuente secundaria toma el relevo.

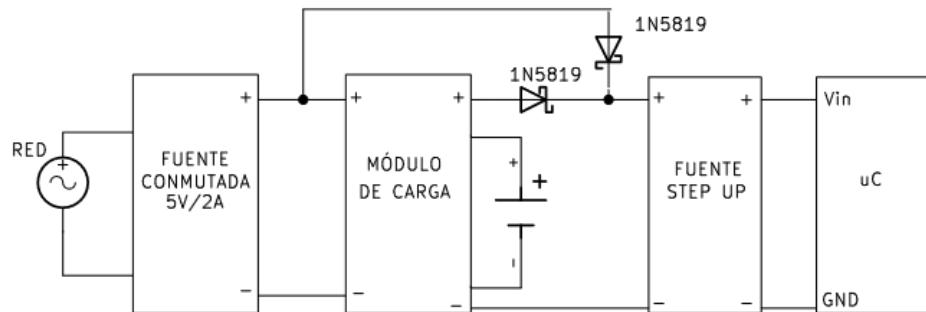


Figura 4.3: Configuración “Load Sharing”

Para llevar a cabo esta propuesta, se seleccionaron diodos schottcky 1N5819 debido a que proporciona conmutaciones rápidas entre los estados de conducción y bajas tensiones umbral ( $V_F$ ), siendo esta última característica la más importante ya que la caída de tensión entre cualquiera de las fuentes de energía y la carga es menor en comparación a otras clases de diodos.

#### 4.4. Esquemático y PCB

En base a lo expuesto en el capítulo 3, en el que se detalló y justificó la selección de los distintos componentes que se emplearan en el proyecto, y lo descrito en este capítulo donde se realizó el diseño y cálculos de los distintos circuitos necesarios con el fin de relacionar las distintas partes y garantizar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, en la Figura 4.4 se ilustra el esquemático completo del sistema, que integra todo lo mencionado anteriormente. En la Tabla 4.1 contiene la lista de componentes necesarios para el montaje de la placa única que se implementará en el sistema.

En este esquemático se agrega el uso de capacitores de desacople a la entrada de la alimentación principal de la placa, donde es conectada la fuente de 5 V y, además, a la entrada de la alimentación del microcontrolador ESP8266. Los capacitores de desacople utilizados son del tipo electrolíticos de 10  $\mu\text{F}$  para el filtrado del ruido a bajas frecuencias y del tipo cerámicos de 0,1  $\mu\text{F}$  para el filtrar el ruido a altas frecuencias.

Para el desarrollo de la placa de circuito impreso (PCB) se utilizó el software *KiCad*, que es una suite de automatización de diseño electrónico (EDA) gratuita y de código abierto. Cuenta con captura de esquemas, simulación de circuitos integrados, diseño de placas de circuitos impresos (PCB), renderizado 3D y trazado/exportación de datos a numerosos formatos.

Se optó implementar un PCB de dos capas para reducir las dimensiones de la placa y logra una mejor distribución de los componentes en torno a las funciones que desempeñan en el sistema.

La distribución del PCB por la cara frontal (Figura ??) se ubican principalmente los elementos y componentes destinados para la interacción local con el usuario. Por el sector izquierdo, colocaron verticalmente los indicadores visuales (LEDs) de conexión a la red eléctrica, conexión a la red WiFi y la alerta del sistema, en el orden de arriba hacia abajo, respectivamente. En el centro, se ubicó el display OLED y a la misma altura, por el sector derecho se colocó el pulsador multifunción (“FUNCION”).

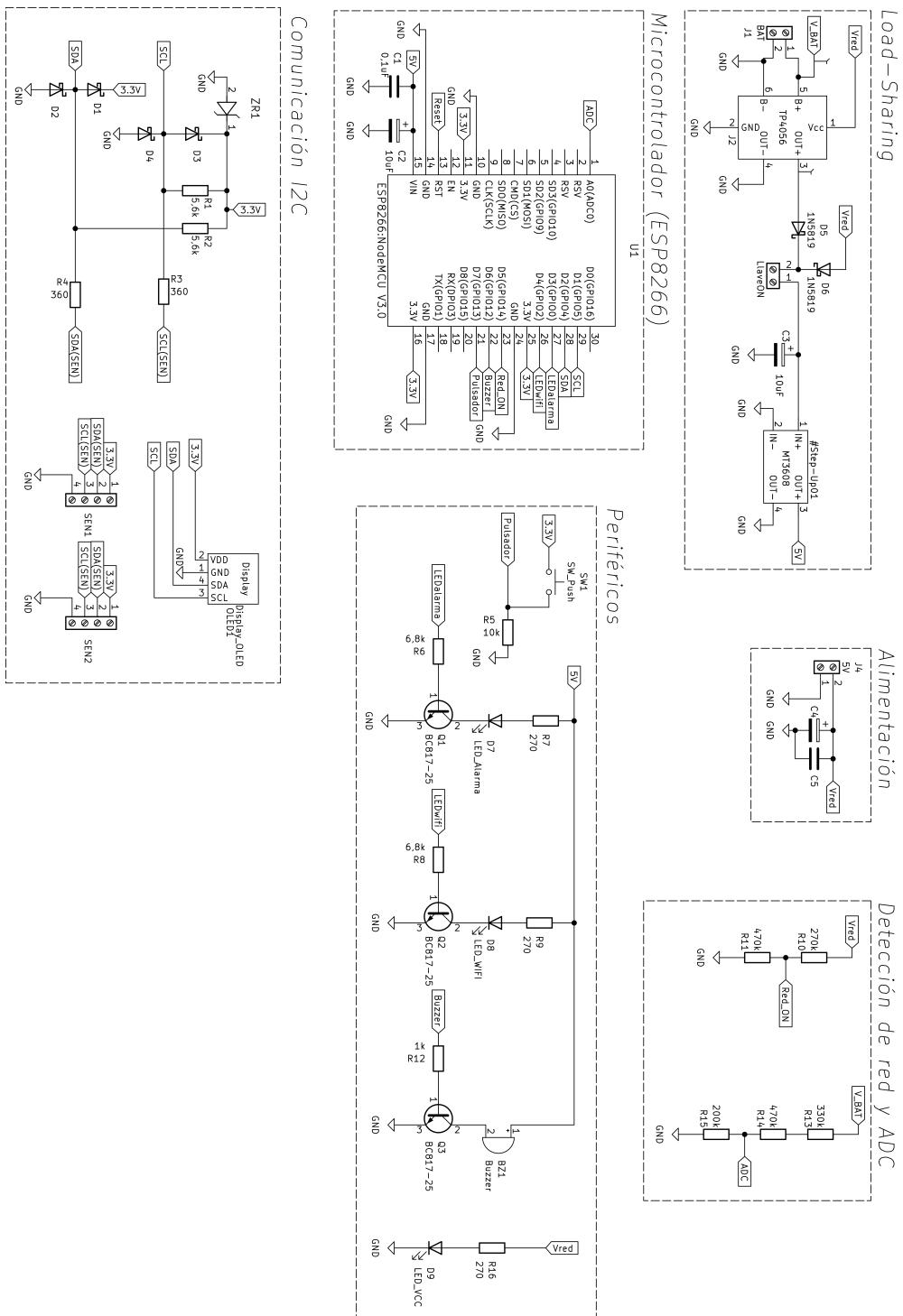


Figura 4.4: Esquemático completo de la placa principal del sistema

Ref	Valor	Descripción	Cant.
BZ1	YHE12	Buzzer 5 V, polarizado	1
C1, C5	0,1 $\mu$ F	Capacitor cerámico, THT	2
C2, C3, C4	10 $\mu$ F	Capacitor Electrolítico, 10 V, THT	3
D1, D2, D3, D4	BAT42	30V 0,2A Diodo Schottky de baja señal, DO-35	4
D5, D6	1N5819	40V 1A Diodo Schottky, DO-41	2
D7	-	LED 5 mm	1
D8	-	LED 5 mm	1
D9	-	LED 5 mm	1
J1, J2, J3	B2B-XH-A	Conector JST-XH (Header), Entrada superior, 2 circuitos	3
M1	-	Módulo de carga para baterías Li-Ion de 1 A (TP4056)	1
M2	-	Convertidor DC-DC Boost Elevador Tension Step-Up (MT3608)	1
OLED1	-	Display OLED 0.96 128X64 I2C SSD1306	1
Q1, Q2, Q3	BC817-25	1A Ic, 40V Vce, NPN Transistor, SOT-223	3
R1, R2	5,6 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	2
R3, R4	360 $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	2
R5	10 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	1
R6, R8	6,8 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	2
R7, R9, R16	270 $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	3
R10	270 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	1
R11, R14	470 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	2
R12	1 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	1
R13	330 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	1
R15	200 k $\Omega$	Resistor, 1/4 W, SMD	1
SEN1, SEN2	S04B-XASK-1	Conector JST-XA (Header), Entrada lateral, 4 circuitos	2
SW1	FS4JAH	Switch Táctil FSMJ Series 6 x 6, THT	1
U1	-	ESP8266 NodeMCU V3.0	1
ZR1	1N5226B	3,3V 500mW, Diodo Zener, DO-35	1

Tabla 4.1: Lista de componentes de la placa principal del sistema



## Capítulo 5

# Diseño de gabinete

En este capítulo se detalla el diseño del gabinete donde se alojará la placa principal del sistema, en conjunto con la fuente de alimentación y la batería de Li-Ion. El gabinete permitirá facilitar la interacción del usuario con el sistema, brindando los medios para la visualización de las alarmas visuales (LEDs) y parámetros de los equipos monitoreados mediante el display e interacción con el pulsador multifunción (“FUNCION”).

Para lograr este diseño, se buscó una opción personalizada que cumpliera con los requisitos del sistema. Por esta razón, se optó por desarrollar el mismo mediante la impresión 3D que, dados los avances alcanzados hoy en día por esta tecnología, ofrece una alternativa viable y accesible de fabricación que brinda varios beneficios, entre ellas, la flexibilidad de llevar a cabo diseños adaptados a las necesidades del proyecto.

El material utilizado para la construcción es el material PLA (ácido poliláctico), que se trata de un plástico biodegradable utilizadas ampliamente en impresiones 3D para la creación de objetos tridimensionales. Entre sus características se destaca su resistencia, bajo peso y propiedades ecológicas ya que no emiten gases tóxicos durante los procesos de impresión. Además, el material PLA ofrece una buena aislación térmica y eléctrica, así como una buena estabilidad dimensional y mecánica, lo cual lo hacen adecuado para esta aplicación.

Para el diseño del gabinete se utilizó el software *FreeCAD*, herramienta de modelado 3D paramétrico gratuita y de código abierto. Utilizado principalmente para el modelado de objetos del mundo real, desde componentes electrónicos hasta grandes objetos como edificios y proyectos de ingeniería civil, con un fuerte enfoque en objetos imprimibles en 3D. El uso de este software tiene la ventaja de trabajar en conjunto con el software de diseño electrónico *KiCAD*, utilizado en este proyecto, por medio del complemento *KicadStepUp Workbench* que permite la creación e importación de placas electrónicas para conseguir un diseño piezas tridimensionales complementarias de manera más precisa.

Las dimensiones del gabinete diseñado son de 155x80x66 mm y consta de tres piezas:

- Tapa frontal: Es donde se aloja la placa principal del sistema y posee el diseño para exponer las alarmas visuales, display y soporte mecánico para el botón del pulsador “FUNCION”.
- Caja: Es donde se aloja la fuente de alimentación y la batería de Li-Ion. También, posee las aberturas necesarias para los cables de los sensores y el cable de alimentación a la red eléctrica.

- **Botón:** Es la pieza que permite al usuario accionar el pulsador “FUNCION”, ubicado en la placa, desde el exterior.

Las dimensiones en detalle de cada una de estas piezas se especifican en sus respectivos planos, que se encuentran en el apéndice de este trabajo. A continuación se realiza una descripción del diseño funcional de cada pieza.

## 5.1. Tapa Frontal

En la parte frontal posee las aberturas con las formas de los tres indicadores que permiten visualizar el estado del sistema mediante las luces LEDs. Estos son:

- **Enchufe:** Conexión a la red eléctrica.
- **WiFi:** Conexión a la red WiFi.
- **Símbolo de alerta:** Indicador de anomalías en la temperatura de los equipos refrigerantes.

Junto a cada una de estas aberturas viene acompañado de un texto que identifica el indicador. También posee la abertura para la visualización del display OLED, donde se muestra la información relevante del sistema. Además, cuenta con la abertura donde se ubica el único botón del sistema, para el accionamiento del pulsador de la placa principal.



Figura 5.1: Tapa de Gabinete: Vista frontal

Por la parte posterior, se ha integrado a la carcasa una serie de guías en el sector donde se hallan los LEDs indicadores, para enfocar la luz hacia el área de las aberturas correspondientes. También, se integró un marco a la abertura del display OLED para alojar un acrílico protector y brindar hermetismo al gabinete, evitando el ingreso de polvo o humedad. Además, se incorporó unas guías para el botón

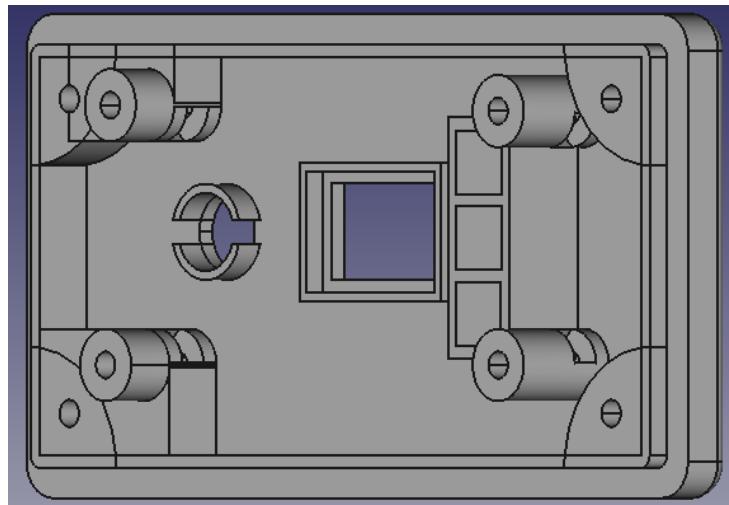


Figura 5.2: Tapa de Gabinete: Vista posterior

“FUNCION” para evitar que se desvíe del pulsador, garantizando un correcto accionamiento de este último. Para la sujeción de la placa principal del sistema a la tapa, se incorporaron los soportes necesarios alineados con los orificios de sujeción del PCB. La fijación son realizadas mediante tornillos de 3 mm diámetro y tuercas M-5 (DIN-934) exterior. Cada uno de estos soportes posee una abertura suficiente para inserción las tuercas sin debilitar su estructura.

## 5.2. Caja

La tapa del gabinete es apoyado sobre unos soportes que posee la caja en el lado interior, la cual es fijada mediante tornillos de 3 mm de diámetro que se insertan en los orificios correspondientes. En los laterales de la caja, existen unas aperturas que intersectan estos orificios y permiten introducir tuercas

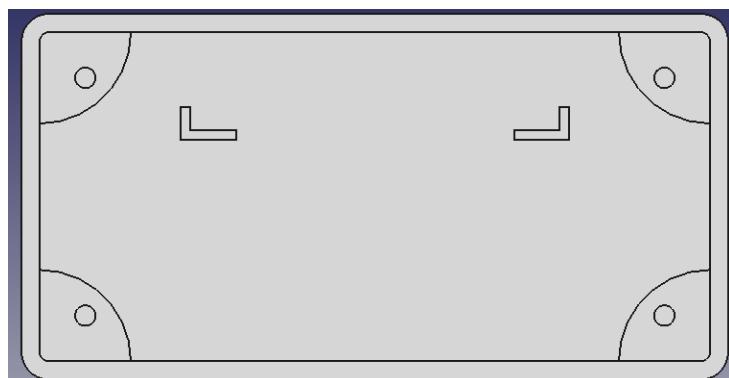
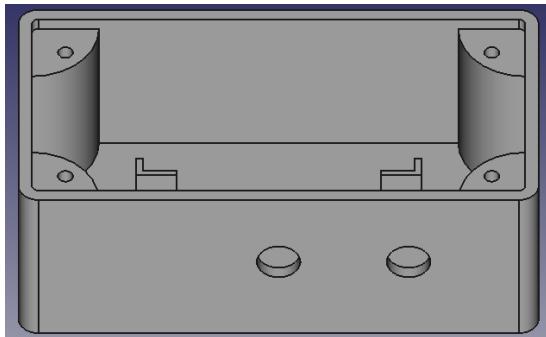
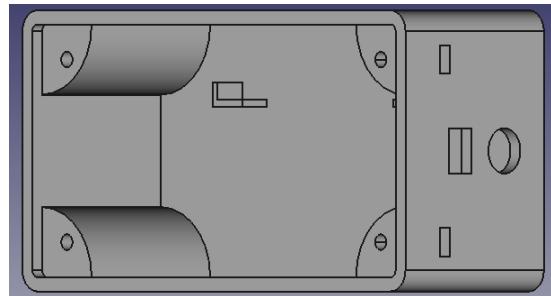


Figura 5.3: Caja de Gabinete: Vista Frontal

M-5 para asegurar los tornillos. La disposición del lado externo de estas aberturas facilita el armado del gabinete y brinda hermetismo y evita la entrada de humedad o polvo en el interior. En el fondo de la caja se encuentra integrado en el piso un marco con las dimensiones exactas para alojar un zócalo de una batería 18650.



(a) Vista inferior



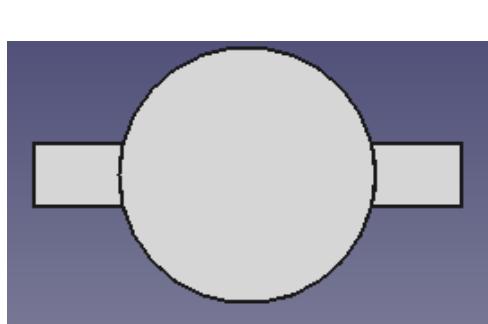
(b) Vista lateral derecha

Figura 5.4: Caja de gabinete: Aberturas

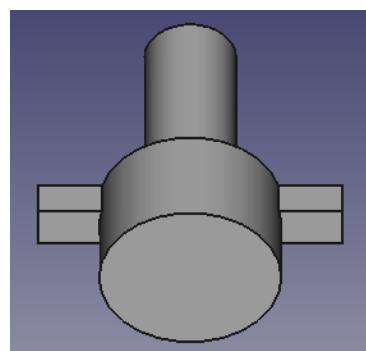
Por la cara inferior de la caja existen dos aberturas con un diámetro de 13 mm por donde pasan los cables de los sensores a través de prensacables plásticos de 1/2 pulgada. Por la cara lateral derecha se presenta otra apertura de 13 mm para el cable de alimentación, con su respectivo prensacable de plástico de 1/2 pulgada, y una abertura adicional para la colocación de la llave de corte del sistema.

### 5.3. Botón

El botón se encuentra conformado por partes cilíndricas. El cilindro mayor, que es visible desde el exterior, posee un diámetro de 12 mm y una longitud de 7 mm. Este tiene incorporado un par de aletas



(a) Vista frontal



(b) Vista superior

Figura 5.5: Botón de gabinete

que, en conjunto con las guías presentes en la cara interior de la tapa del gabinete, permite alinear de manera correcta el botón con el pulsador de la placa principal. El cilindro menor, que entra en contacto con el pulsador, posee un diámetro de 6 mm y una longitud de 13,5 mm.



# Capítulo 6

# Software

Este capítulo presenta el desarrollo del software que se implementó en el sistema para monitorear equipos refrigerantes mediante el microcontrolador ESP8266. Se explica el entorno de desarrollo y las extensiones que se utilizaron para escribir, depurar y cargar el código en el sistema embebido, destacando sus características y ventajas. Se describe la estructura general del software, basada en un enfoque de programación específico, y se mencionan las librerías que se emplearon para garantizar la confiabilidad y robustez del sistema. Se detalla la ejecución de las rutinas principales, con sus respectivos diagramas de flujo, que ilustran el funcionamiento del sistema.

## 6.1. Entorno de desarrollo

El software se desarrolló con el editor de código Visual Studio Code, que es una herramienta de desarrollo integrada que permite escribir, compilar y depurar código en diferentes lenguajes de programación, entre ellos el C++ que es ampliamente utilizado en la programación de sistemas embebidos. La extensión PlatformIO es un complemento que facilita la creación de proyectos para plataformas embebidas como el ESP8266 de ESPRESSIF, utilizado para este proyecto para el monitoreo de temperatura y humedad. A continuación, se describen sus características y cómo se aprovechan sus ventajas para el desarrollo del código.

### 6.1.1. Visual Studio Code

Visual Studio Code (VS Code) es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft. Es software libre y multiplataforma, disponible para Windows, GNU/Linux y macOS.

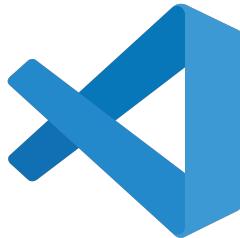


Figura 6.1: Logo de Visual Studio Code

VS Code tiene una gran variedad de características útiles para agilizar el trabajo, entre las cuales se encuentra:

- Asistencia en el desarrollo del código: Este editor de código integra la función *IntelliSense* que se encarga del autocompletado y resaltado de sintaxis, lo que permite agilizar el proceso de escritura del código.
- Depuración: Incluye la función de depuración que ayuda a detectar errores en el código, evitando tener que revisar línea por línea del código para encontrar errores. Además, VS Code también es capaz de detectar pequeños errores de forma automática y al instante durante la escritura del código antes de realizar la depuración como tal.
- Extensiones: Las extensiones permiten personalizar y agregar funcionalidad adicional de forma modular y aislada. Por ejemplo, para programar en diferentes lenguajes, conectar con otros servicios, etc. Permiten tener una mejor experiencia sin afectar el rendimiento del editor.

### 6.1.2. PlatformIO

PlatformIO es un ecosistema de desarrollo libre y gratuito para sistemas embebidos que proporciona un entorno de trabajo unificado que abstrae las diferencias de hardware y software. Su funcionalidad incluye la gestión de bibliotecas, la instalación de los toolchains adecuados, la compilación y lindeo del código fuente, la detección automática de puertos, la descarga del código a la placa, y otras acciones.



Figura 6.2: Logo de PlatformIO

Se trata de una herramienta multiplataforma que se puede instalar de forma independiente mediante una interfaz de comandos (CLI) o integrar en varios editores de texto, como Visual Studio, que

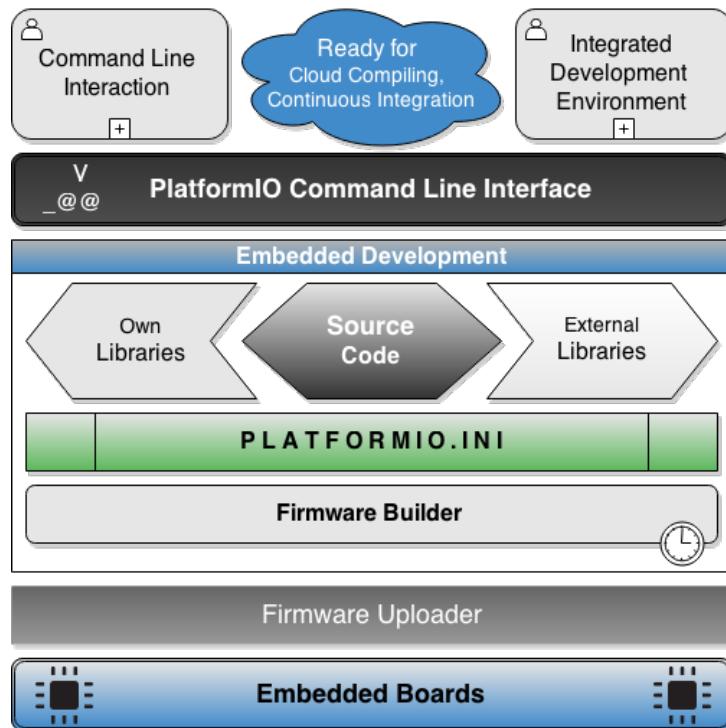


Figura 6.3: Diagrama de bloques para carga de códigos en plataformas

se mencionó anteriormente. En la Figura 6.3 se presenta un esquema de los pasos y elementos que participan en la carga del software en un sistema embebido.

Una de sus características principales que lo destacan, es que la configuración general del proyecto está plasmada en un único archivo llamado platformio.ini, donde se describe la plataforma de hardware, el framework de desarrollo, entre otras configuraciones. En el archivo platformio.ini pueden existir diferentes configuraciones para diferentes entornos compartiendo el mismo código fuente. Basándose en el archivo de configuración del proyecto, el sistema se encarga de descargar e instalar todas los requerimientos necesarios. Con este archivo de configuración de proyecto, es posible manejar de manera sencilla la descarga y utilización de bibliotecas externas que posibilitan el desarrollo de proyectos complejos. Así, el usuario utiliza una única herramienta para realizar todas las tareas de desarrollo necesarias para crear, compilar y descargar el código al hardware.

## 6.2. Estructura del programa

En esta sección se describe como se encuentra organizado el código fuente que se ejecuta en el microcontrolador ESP8266 para llevar a cabo el sistema de monitoreo.

El software se diseñó utilizando el enfoque de la programación orientada a objetos en el lenguaje C++, que brinda una mejor organización del programa y simplificación de los mecanismos de actualiza-

ción de datos y estados asociados a los equipos de refrigeración que se monitorean o al propio sistema.

Para ello, en el código se definen tres estructuras de datos *Struct* donde se almacena información que es utilizado en forma constante en distintas partes parte del programa:

- **Estado:** Esta estructura contiene la información necesaria para el funcionamiento y el control del sistema, incluyendo el estado de las alarmas en general de todos los equipos refrigerantes, estado de la alarma sonora (buzzer), pantalla visible en el display, la conexión a la red WiFi configurada o a una nueva red WiFi disponible, entre otros aspectos relevantes.
- **Equipo:** Esta estructura almacena la información de cada equipo refrigerante, incluyendo los valores de temperatura y humedad, los límites superior e inferior del parámetro de temperatura y la dirección de memoria EEPROM donde se guardan. También registra si existen anomalías en las mediciones de temperatura. Esta estructura provee los métodos para inicializar y muestrear el sensor correspondiente y para guardar los límites en la memoria EEPROM.
- **Eventos:** Posee una serie de valores enteros que funcionan como contadores para gestionar la ejecución de las distintas tareas del sistema de monitoreo de manera óptima y organizada. Los eventos que controla son:
  - Muestreo de los parámetros de temperatura y humedad.
  - Consultas al servidor y atención a acciones del usuario vía Telegram.
  - Tiempo de espera para configuración de valores límites de temperatura vía Telegram.
  - Envío de mensajes a usuarios para alertar ante la existencia de anomalías del sistema.
  - Reconexión a red WiFi configurada en caso de desconexión.
  - Tiempo de espera para inicio de configuración para conexión a nueva red WiFi.

Posteriormente, el código se estructura según la arquitectura del framework de Arduino, que consiste en dos funciones principales: *setup* y *loop*. La función *setup* se ejecuta solo una vez al iniciar el programa y realiza las siguientes tareas: configuración de las entradas y salidas digitales (GPIO), definición de las fuentes de las rutinas de servicio a la interrupción (RSI), inicialización y configuración de la interfaz del bot de Telegram y verificación del funcionamiento de los sensores de temperatura y humedad. La función *loop* se ejecuta de forma repetitiva y contiene los algoritmos para llevar a cabo las tareas mencionadas anteriormente en la estructura de datos de “Eventos”, las cuales se describirán con detalle a lo largo de este capítulo.

### 6.2.1. Requerimientos de Librerías

Una librería es un archivo que el compilador puede leer y en el que encuentra las instrucciones de uso de una gran cantidad y variedad de métodos y funciones[27]. El uso de librerías permite reducir el tiempo de escritura y depuración del código, así como evitar la redundancia y facilitar el mantenimiento del mismo. Esto contribuye al desarrollo eficiente de las funcionalidades que definen al sistema de monitoreo. A continuación, se enumeran las librerías empleadas en el programa para su correcto funcionamiento:

1. Librerías de WiFi y configuración:

- ESP8266WiFi.h: Librería para la gestión de la conexión WiFi en el ESP8266.
- DNSServer.h: Librería para la configuración de un servidor DNS local en el ESP8266.
- ESP8266WebServer.h: Librería para la creación de un servidor web en el ESP8266.
- WiFiManager.h: Librería para facilitar la configuración y gestión de la conexión WiFi.

2. Librerías de EEPROM:

- EEPROM.h: Librería para el manejo de la memoria EEPROM en el ESP8266.

3. Librería de Ticker:

- Ticker.h: Librería para la gestión de interrupciones periódicas (tickers).

4. Librería de Telegram Bot:

- CTBot.h: Librería para interactuar con la API de Telegram y crear un bot.
- ArduinoJson.h: Librería para el manejo de datos JSON en Arduino.

5. Librería de Sensor de Temperatura y Humedad:

- AHTxx.h: Librería para la lectura de datos del sensor de temperatura y humedad AHT10.

6. Librería de Display OLED:

- U8g2lib.h: Librería para cargar las pantallas en el display.

7. Otras librerías generales:

- Wire.h: Librería para la comunicación I2C entre dispositivos.

Estas librerías son requeridas para que el programa funcione correctamente, ya que proporcionan funcionalidades como la gestión de WiFi, la comunicación con Telegram, la lectura del sensor de temperatura y humedad, entre otras.

### 6.3. Inicialización y configuración de E/S digitales

Del microcontrolador ESP8266, como se mencionó en el capítulo de “Selección de componentes”, tiene 17 pines de entrada y salida de propósito general (GPIO0-GPIO15). Sin embargo, no todos estos pines son adecuados para su uso, ya que algunos tienen funciones específicas que pueden interferir con el funcionamiento normal del dispositivo[28]. Por ejemplo, los pines GPIO6-GPIO11 están conectados a la memoria Flash interna del microcontrolador y no deben usarse para otros fines. De esta forma, solo quedan disponibles 11 pines GPIO, que además requieren ciertas precauciones para ser utilizados. En

la Tabla 6.1 se muestran los pines GPIO recomendados y sus nombres correspondientes en la placa de desarrollo NodeMCU V3.0 que se empleó en este proyecto.

Etiqueta	GPIO	Entrada	Salida	Notas
D0	GPIO16	No utilizar para interrupciones	No brinda soporte para funciones I2C y PWM	ALTO en el inicio usado para despertar al uC en el modo de suspensión “Deep Sleep”
D1	GPIO5	OK	OK	Normalmente utilizado como SCL (I2C)
D2	GPIO4	OK	OK	Normalmente utilizado como SDA (I2C)
D3	GPIO0	pulled up	OK	Conectado al botón FLASH, el arranque falla si se encuentra en BAJO
D4	GPIO2	pulled up	OK	ALTO en el inicio, conectado al LED integrado, el arranque falla si se encuentra en BAJO
D5	GPIO14	OK	OK	SPI (SCLK)
D6	GPIO12	OK	OK	SPI (MISO)
D7	GPIO13	OK	OK	SPI (MOSI)
D8	GPIO15	Conectado a GND	OK	SPI (CS) El arranque falla si se encuentra en ALTO
RX	GPIO3	OK	RX pin	ALTO en el inicio
TX	GPIO1	TX pin	OK	ALTO en el inicio, el arranque falla si se encuentra en BAJO
A0	ADC0	Entrada analógica	-	-

Tabla 6.1: Desempeño de las GPIOs del NodeMCU V3.0 como entradas y salidas

La Tabla 6.1 muestra que las GPIOs disponibles tienen estados lógicos predefinidos durante el proceso de inicio del microcontrolador. Estos estados lógicos son necesarios para que el microcontrolador pueda arrancar correctamente. Si alguna de estas entradas se altera externamente y cambia su estado lógico, el microcontrolador no podrá iniciar su funcionamiento. Al asignar los pines para los distintos componentes seleccionados, mencionados en la Tabla 3.5, se tuvieron en cuenta estas restricciones. La Tabla 6.2 resume la asignación de pines realizada.

El protocolo de comunicación I2C permite controlar los sensores de temperatura y humedad, así como el display OLED, mediante dos líneas: una de datos (SDA) y otra de reloj (SCL). Estas líneas se conectan a los pines D2 y D1 del microcontrolador ESP8266, que implementa la comunicación I2C

Componentes	GPIO	Modo de operación
Sensores de temperatura y humedad (AHT10)	D1 (SDA) y D2 (SCL)	E/S
Display (OLED 128x64 píxeles)		
LED de Alarma	D3	Salida
LED de WIFI	D4	Salida
Buzzer	D6	Salida
Pulsador	D7	Entrada
Pin para detección energía de Red	D5	Entrada

Tabla 6.2: Asignación y modo de operación de las GPIOs

por software. Para la designación del pin digital del pulsador se tuvo en cuenta que el mismo realiza multifunciones según el tiempo de que se encuentre accionado. Para ello, se requiere implementar una interrupción externa para detener temporalmente la rutina principal y ejecutar las tareas asociadas al pulsador. De acuerdo con la hoja de datos del microcontrolador, se puede configurar cualquier GPIO como interrupción externa, excepto el D0 (GPIO16). Por lo tanto, se seleccionó el pin D7 para conectar el pulsador multifuncióñ.

## 6.4. Rutinas de Servicio a la Interrupción (RSI)

Para lograr un funcionamiento controlado y organizado del programa, se implementan dos interrupciones del sistema: una realizada por software dado por el temporizador/contador que se utiliza como base de tiempo del sistema y la otra, del tipo externa dado por el accionamiento del pulsador. A continuación, se detalla la configuración y rutinas ejecutas durante estas interrupciones.

### 6.4.1. RSI: Temporizador

El ESP8266 cuenta con dos temporizadores/contadores, uno de 32 bits (timer0) y el restante de 23 bits (timer1). El módulo timer0 se emplea internamente para gestionar las funciones relacionadas con la conectividad WIFI, por lo que no se recomienda su uso en el programa. El módulo timer1, en cambio, se puede configurar y utilizar libremente para generar interrupciones periódicas o eventos de control.

Por este motivo, se utiliza el timer1 en el modo de operación normal, en el que el registro contador (FRC1) se carga con un valor inicial y se decremente hasta cero, momento en el que se produce una interrupción por desbordamiento. La frecuencia de las interrupciones está definida por siguiente expresión:

$$t_{\text{TIMER1}} = \frac{FRC1 * PR}{f_{\text{OSC}}} \quad (6.1)$$

Donde  $PR$  es el valor de prescaler y  $f_{\text{OSC}}$  es la frecuencia del oscilador utilizado por el microcontrolador que, para el ESP8266, es de 80 MHz.

Se estableció una base de tiempo del sistema de 500 ms, lo que implica un prescaler de 16 ciclos de reloj. Sustituyendo estos datos en la ecuación 6.1, se deduce que el valor del contador que se debe recargar, tras cada desbordamiento, es de  $2,5 \times 10^6$ .

En la Figura 6.4 se presenta el diagrama de flujo de la rutina ejecutada de manera secuencial por cada interrupción del timer1. Las funciones principales que realiza esta rutina es encargarse de la secuencia accionamiento de los avisos visual (LEDs) y sonoros (buzzer) y , también, en gestionar las habilitaciones de eventos a ser ejecutados en la rutina principal.

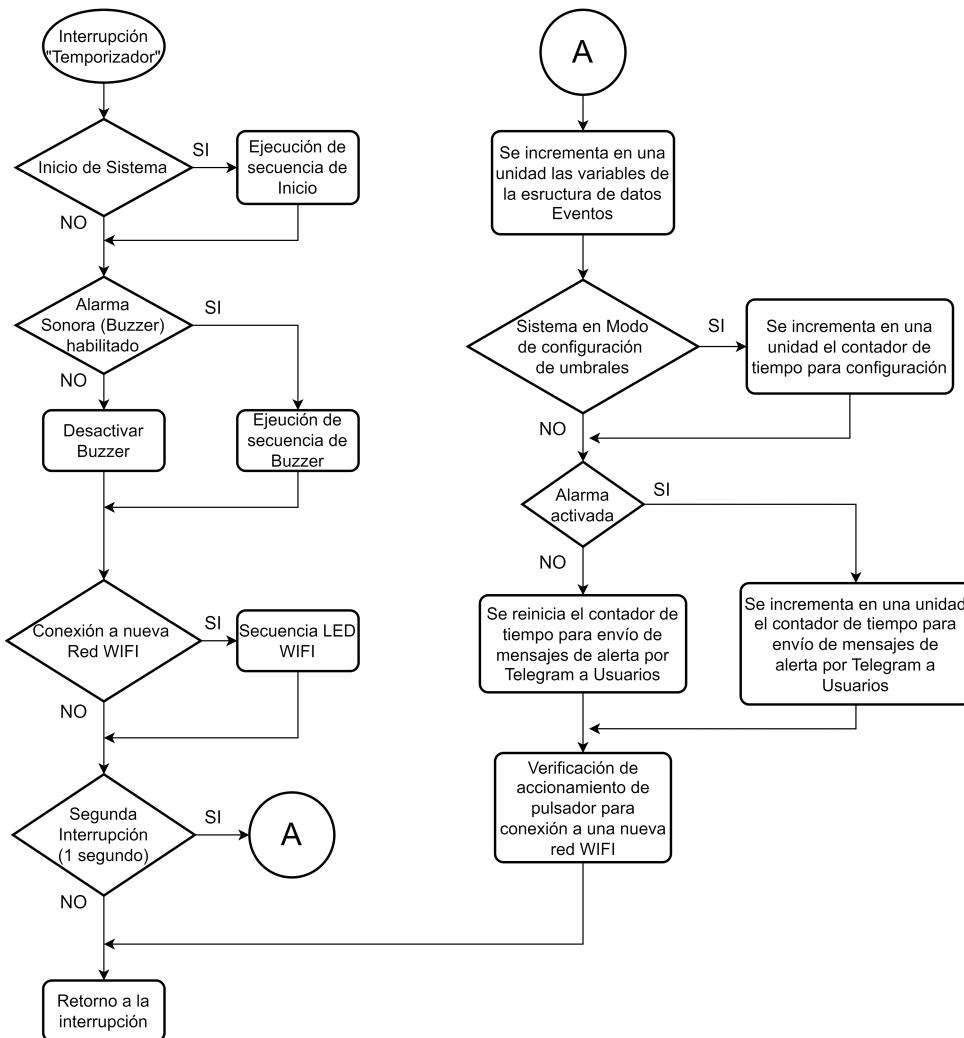


Figura 6.4: Diagrama de Flujo de la RSI Temporizador

Una vez iniciado el sistema, RSI del temporizador se encarga de realizar la secuencia de inicio para alertar el encendido, alternando el encendido de los LEDs presentes en el frente del panel. Por cada interrupción, verifica la ejecución de la secuencia del buzzer de la alarma sonora, la cual se desactiva

automáticamente al restablecerse el funcionamiento normal o por intervención del usuario. El RSI del temporizador incrementa en una unidad los contadores de la estructura de datos “Eventos”, mencionados en la sección 6.2, cada dos interrupciones. Además, se encarga de llevar el tiempo para cancelar los procesos de configuración de los umbrales de temperatura por parte del usuario y el tiempo para el envío de mensajes de alerta a los usuarios, por medio de Telegram cuando se presentan anomalías en alguno de los equipos refrigerantes.

También, la rutina se encarga de detectar el estado del pulsador que activa el modo de configuración de la red WIFI y controlar el LED indicador del estado de la conexión WIFI. Cuando el pulsador se mantiene presionado por más de cinco segundos, la rutina inicia el proceso de búsqueda y selección de una nueva red WIFI disponible. Durante este proceso, el LED parpadea con una frecuencia de 1 Hz para informar al usuario que el dispositivo está en modo de configuración. Una vez que se establece la conexión con la red WIFI elegida, el LED se enciende de forma continua.

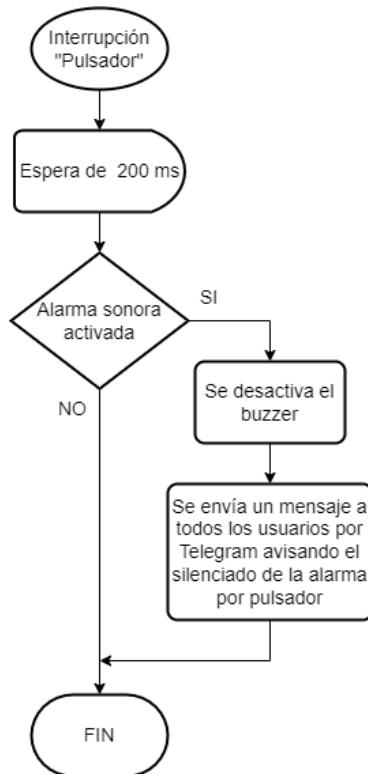


Figura 6.5: Diagrama de Flujo de la RSI Pulsador

#### 6.4.2. RSI:Pulsador

Anteriormente, se indicó que el pin D5 fue asignado como entrada digital para detectar los cambios de estado del pulsador multifunción. Dado que el pulsador se encuentra conectado a una resistencia *pull-up*, se configura el modo de interrupción externa por flanco ascendente. El diagrama de flujo de la

Figura 6.5 muestra la rutina que se ejecuta después de la interrupción externa, la cual comienza con un retardo de 200 ms para evitar falsas interrupciones causadas por el efecto rebote del pulsador.

El objetivo principal de esta rutina, durante la operación normal del sistema, es silenciar la alarma sonora en el caso que la temperatura de alguno de los equipos refrigerantes se encuentre fuera del rango establecido. Además, da inicio al tiempo de espera para verificar el estado activo del pulsador, realizado posteriormente por RSI del temporizador, para la configuración de la red WIFI del sistema.

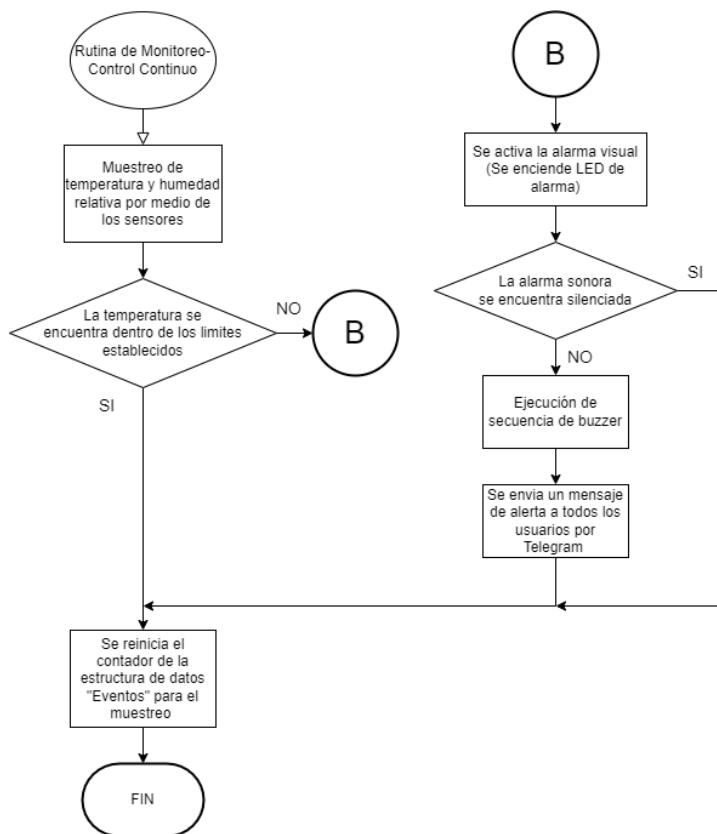


Figura 6.6: Diagrama de Flujo de la Rutina de Muestreo-Control continuo de temperatura y humedad relativa para cada uno de los equipos refrigerantes

## 6.5. Control y monitoreo continuo

Para el monitoreo de las variables de temperatura y humedad en cada uno de los equipos, se empleó una estrategia de muestreo con una frecuencia de 5 segundos. Este valor se determinó como adecuado, dado que las variaciones térmicas e higrométricas en el recinto refrigerado son lentas y no requieren una mayor resolución para esta aplicación, de manera que no existe una pérdida de información relevante

entre muestras. El diagrama de flujo que describe el control de temperatura y humedad se presenta en la Figura 6.6.

Esta secuencia se ejecuta en la rutina principal en el que primero se realiza el muestreo de los parámetros para cada uno de los equipos refrigerantes, mediante un método definido en la estructura de datos “Equipo” el cual se encarga de solicitar y recibir los datos mediante el protocolo I2C y verifica que estos valores estén dentro de los límites definidos para dicho equipo.

Si la temperatura se halla fuera del rango preestablecido, se activan alarmas visuales y sonoras. Asimismo, se envían mensajes de alerta a los usuarios que integran el sistema con la información detallada del equipo afectado y el límite de temperatura excedido. El sistema envía estos mensajes de alerta, mientras persista la anomalía, con una frecuencia de dos minutos en un total de 5 veces a todos los usuarios. El envío de estos mensajes se cancela cuando alguno de los usuarios solicita el silenciamiento de las alarmas, el cual también detiene la alarma sonora, quedando solamente activa la alarma visual (LED) para indicar la continuidad del problema.

El sistema de alarma incorpora un mecanismo de histéresis de 0,5°C para evitar disparos innecesarios por variaciones térmicas insignificantes. La histéresis implica que la alarma solo se activa cuando la temperatura del equipo afectado rebasa el límite superior preestablecido, y solo se desactiva cuando la temperatura desciende por debajo del límite superior menos la histéresis. De forma análoga, la alarma solo se activa cuando la temperatura del equipo afectado cae por debajo del límite inferior preestablecido, y solo se desactiva cuando la temperatura asciende por encima del límite inferior más la histéresis.

## 6.6. Atención de consultas de Telegram

### 6.6.1. Configuración de bot

La comunicación con el bot de Telegram, que permite el monitoreo remoto de las variables de temperatura y humedad y el envío de avisos de alerta, requiere la instalación de la librería *CBot*. Esta librería es una clase especializada en el manejo de bots de Telegram para plataformas de la marca ESPRESSIF, en particular para los modelos ESP8266 y ESP32.

Después de incluir esta librería, se conecta el bot a la API de Telegram Bot usando el *Token* del bot, que es un código alfanumérico único que se obtiene al crear el bot, siguiendo las instrucciones del Apéndice A.

Luego, se puede recibir mensajes del servidor creando un objeto de la clase, con el que se puede verificar la llegada de nuevos mensajes y enviar mensajes a los diferentes usuarios de Telegram mediante los distintos miembros disponibles en la clase *CBot*.

### 6.6.2. Rutina de atención a solicitudes

En la Figura 6.7 se presenta la rutina para la atención de solicitudes por parte de los usuarios habilitados por medio del bot de Telegram. Esta rutina se ejecuta cada cinco segundos dentro de la rutina principal, permitiendo liberar al microcontrolador para realizar las tareas de muestreo en los sensores y comprobación de los mismos con los rangos preestablecidos, y también se debe a que es necesario

que transcurra un tiempo de la última consulta ya que el servidor de Telegram admite solamente una solicitud cada tres segundos.

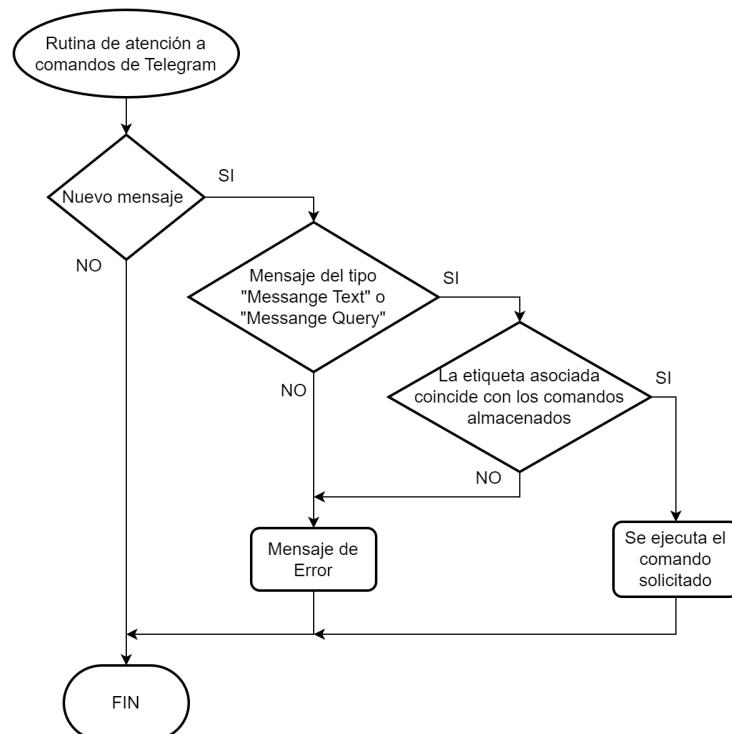


Figura 6.7: Diagrama de Flujo de la Rutina de atención de comandos por Telegram

La secuencia inicia realizando una consulta al servidor para verificar la llegada de un nuevo mensaje por parte de algún usuario. La interfaz del bot está diseñada para que el usuario interactúe principalmente con botones de consulta (*Message Query*), salvo en algunos casos donde se requiere ingresar mensajes de texto (*Message Text*) para configurar los límites de temperatura o introducir comandos especiales, que se explicarán más adelante. Si el mensaje recibido no corresponde a ninguno de estos tipos, el sistema envía un mensaje de error al usuario indicando que el ingreso es inválido.

Cada mensaje válido tiene asociado una etiqueta en forma de comando, que el sistema compara con los comandos almacenados y ejecuta la acción solicitada. Los comandos disponibles son los siguientes:

- **/teclado:** Despliega el menú principal del sistema. Los botones que se despliegan de este menú son:
  - Consultar Temperatura y Humedad Relativa
  - Silenciar Alarmas
  - Config. de Umbrales

- **/datos:** Vinculado al botón de “Consultar Temperatura y Humedad Relativa” del menú principal. El sistema envía un mensaje al usuario solicitante con la información actual de temperatura y humedad relativa de todos los equipos refrigerantes.
- **/alarm\_off:** Vinculado al botón de “Silenciar Alarmas” del menú principal. Silencia la alarma sonora (buzzer) si la temperatura de alguno de los equipos está fuera del rango establecido. Luego, el sistema envía un mensaje a todos los usuarios notificando el silenciado de la alarma y el usuario que lo realizó. Si la alarma no está activada, el sistema envía un mensaje al usuario que solicitó el comando informando esa situación.
- **/config:** Vinculado al botón “Config. de Umbrales” del menú principal. Despliega el menú para realizar la configuración de umbrales de los equipos refrigerantes. Las opciones que se muestran son:
  - Configurar frigorífico 1
  - Configurar frigorífico 2
  - Consultar umbrales actuales
- **/set\_umbral\_f1:** Vinculado al botón “Configurar frigorífico” del menú de configuración. Despliega el menú de umbrales para definir los límites de temperatura del equipo refrigerante uno. Los botones que se despliegan son:
  - Umbral Superior
  - Umbral Inferior
- **/set\_umbral\_f2:** Vinculado al botón “Configurar frigorífico 2” del menú de configuración. Realiza lo mismo que el comando “/set\_umbral\_f1” pero para el equipo refrigerante dos.
- **/umbrales:** Vinculado al botón “Consultar umbrales actuales” del menú de configuración. El sistema envía un mensaje al usuario que solicitó el comando con la información de los valores actuales de umbral superior e umbral inferior de todos los equipos.
- **/umbral\_sup:** Vinculado al botón “Umbral Superior” del menú de umbrales para definir los límites de temperatura. El sistema realiza el envío de un mensaje con el texto “Ingrese el umbral inferior de temperatura para el frigorífico X” donde X es el identificador del equipo refrigerante seleccionado en el menú de configuración. El sistema espera la respuesta del usuario y verifica si el valor ingresado es válido. El valor es válido si cumple las siguientes condiciones:
  - Es mayor que el umbral inferior actual.
  - Es distinto al umbral superior actual.
  - Es menor o igual a 100 °C.
  - Es un número.

Si el valor es válido, el sistema actualiza el umbral superior del equipo y envía un mensaje de confirmación a todos los usuarios vinculados al bot informando el nuevo valor configurado y el usuario la que realizó. Si el valor no es válido, el sistema envía un mensaje de error al usuario indicando la causa de la invalidez. Si el usuario no responde en un plazo de veinte segundos, el sistema cancela la operación y envía un mensaje de aviso al usuario.

- **/umbral\_inf:** Vinculado al botón “Umbral Inferior” del menú de umbrales para definir los límites de temperatura. Funciona de manera análoga al comando de “/umbral\_sup” pero para el caso de umbral inferior.
- **/test:** Comando utilizado para realizar la secuencia de prueba para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, en lo que respecta a la alarma visuales y sonoras, como así también la comprobación del pulsador.

## 6.7. Optimización de energía

Durante la sección 3.5.1 sobre el cálculo de la capacidad de la batería de Li-Ion, se analizó el consumo de energía del sistema de monitoreo con un perfil de funcionamiento continuo, con el que se llegó a determinar el valor de la capacidad mínima de la batería de manera de lograr la meta de una autonomía de 24 horas. Aunque existen baterías de Li-Ion con capacidades superiores al valor calculado para cubrir este requisito, se pueden aprovechar las funcionalidades de bajo consumo del microcontrolador ESP8266 para conseguir un menor consumo de energía en los períodos que el dispositivo se encuentra operando tareas con baja exigencia. De esta forma, se puede disminuir la capacidad necesaria de la batería para lograr la autonomía del sistema.

Para minimizar el consumo de energía en modo de suspensión en el microcontrolador, la mayoría de los procesos en el dispositivo se detienen y algunos periféricos se desactivan. Los circuitos que normalmente necesitan permanecer activos incluyen circuitos que controlan las secuencias de suspensión y activación, E/S que retienen el estado de los pines del dispositivos y memoria internas que retienen el estado de el dispositivo para su eventual reactivación y operación.

El módulo ESP8266 funciona en los siguientes modos:

- **Modem-Sleep:** En este modo, la CPU está operativa y el módulo WiFi están desactivados. Utilizado en aplicaciones que requieran que la CPU esté funcionando para generar, por ejemplo, señales PWM. Hace que el módulo WiFi se desconecta del AP (Punto de Acceso) WiFi cuando no hay transmisión de datos para optimizar el consumo de energía.
- **Light-Sleep:** En este modo, la CPU y todos los periféricos están en pausa. Cualquier activación, como interrupciones externas, activará el chip. Sin transmisión de datos, el módulo WiFi se apaga y la CPU se suspende para lograr reducir el consumo de energía.
- **Deep-Sleep:** Para este modo, solo el RTC funciona y mientras que todos los demás componentes se mantienen apagados. Es adecuado en aplicaciones donde la transmisión de datos se realizan en intervalos de tiempo largos.

Item	Modem-Sleep	Light-Sleep	Deep-Sleep
WiFi	OFF	OFF	OFF
Sistema de reloj	ON	OFF	OFF
RTC	ON	ON	ON
CPU	ON	Pendiente	OFF
Corriente de consumo	15 mA	0,4 mA	$\sim 20 \mu\text{A}$

Tabla 6.3: Modos de suspensión del ESP8266

Para lograr un uso eficiente de la batería, se debe definir un perfil de consumo durante el tiempo que el sistema se mantenga funcionando sin la fuente de alimentación principal. Esto requiere establecer un algoritmo que controle el momento que el microcontrolador proceda a ejecutar el modo de suspensión.

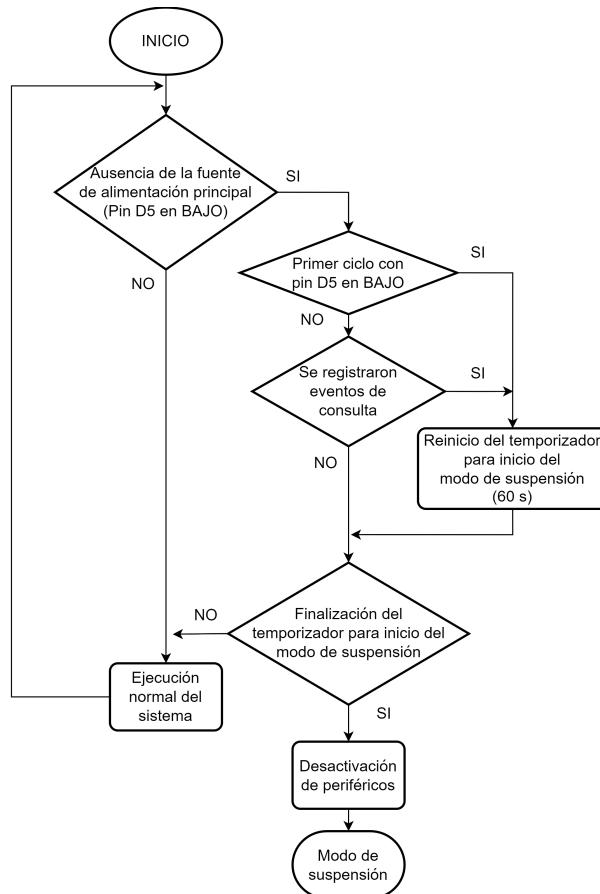


Figura 6.8: Algoritmo del perfil de carga ante la ausencia de la fuente de alimentación principal

El perfil de carga se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 6.8. El algoritmo se activa al detectar la falta de la fuente principal, monitoreado por el pin digital D5 mediante un resistor en configuración

pull-down, al inicio de la rutina principal del sistema. A partir de este momento, se inicia un temporizador, administrado por la RSI "Temporizador", cuya finalidad es permitir la ejecución normal del sistema de monitoreo por un periodo de 60 segundos (1 minuto). Este temporizador se reinicia por cada interacción que realice el usuario con el sistema, ya sea en forma remota al realizar consultas mediante el bot de Telegram o en forma local mediante el accionamiento del pulsador. Cuando el temporizador finaliza, se procede a ejecutar las instrucciones necesarias para reducir más el consumo antes de que microcontrolador efectúe el modo de suspensión. Entre estas instrucciones se incluye el apagado del display y el LED indicador de conexión a WiFi. El LED de alarma, en caso de estar encendido, se mantiene como un testigo para indicar la situación anómala presente en los equipos refrigerantes. Finalizado este procedimiento, el microcontrolador se mantiene en el modo de suspensión.

El modo de suspensión se desactiva por los mismos eventos que reinician el temporizador, y también por la alarma del sistema cuando la temperatura de los equipos refrigerantes está fuera del rango establecido. Para atender estos eventos, se determina que el modo Light-Sleep es el más adecuado para esta aplicación, porque permite salir del modo de bajo consumo ante interrupciones externas. En este caso, la interrupción externa es el pulsado del botón.

El modo Light-Sleep es posible implementarlo de dos formas:

- **Automático:** Logra establecer los modos de suspensión durante la ejecución del programa principal en los periodos en que el microcontrolador se encuentra idle, es decir, cuando no se encuentra realizando tareas, como pueden ser las instrucciones de espera como los delays. La ventaja de este modo es que se mantiene la conexión WiFi con el AP en todo momento, sin la necesidad de interrumpir la ejecución del programa para la reconexión. Esto se logra, mediante el envío de balizas periódicas entre el microcontrolador y el AP para mantener la sincronización.
- **Forzado:** El modo de suspensión es iniciado mediante una instrucción directa del programa. El microcontrolador se mantiene en el modo de suspensión hasta que ocurre una interrupción externa o se cumpla el tiempo establecido, para luego volver a ejecutar la rutina principal. Este modo no realiza la conexión WiFi con el AP, por lo que se debe volver a establecer al salir del modo de suspensión.

Dado que el sistema gestiona los eventos mediante un algoritmo sincronizado con el temporizador interno de 23 bits (timer1), no es posible que el sistema accione el modo de suspensión automático durante el funcionamiento normal, dado que el temporizador depende del sistema de reloj interno, que es desactivado en el modo Light-Sleep. Por lo tanto, para los intervalos que el sistema no reciba consultas, se implementa el modo Light-Sleep Forzado. Para este último, se debe hacer uso del framework *wifi-off* [29], el cual se trata de una rama del framework oficial de Arduino para el ESP8266, que logra el correcto funcionamiento del microcontrolador en este estado de bajo consumo.

El modo de suspensión Light-Sleep Forzado tiene una duración fija de 10 segundos, tras los cuales el sistema se despierta automáticamente. Al reactivarse, el sistema ejecuta un algoritmo que se ilustra en la Figura 6.9, que consiste en los siguientes pasos:

1. Muestreo de las temperaturas de los equipos refrigerantes: Si las temperaturas se encuentran fuera del rango y las alarmas no fueron silenciadas previamente, se interrumpe el modo de sus-

pensión para reanudar con el funcionamiento normal del sistema, avisando de la situación por mediante la alarma.

2. Conexión WiFi con el AP: Se realiza la conexión con la red WiFi guardada en la memoria. Si la reconexión no es posible en un tiempo de 5 segundos, se continua con nuevamente con el modo de suspensión.
3. Consulta al bot de Telegram: Una vez establecida la conexión con el AP, se consulta la llegada de nuevos mensajes al bot. Si existen consultas por parte de los usuarios, se interrumpe el modo de suspensión para reanudar con el funcionamiento normal del sistema durante un intervalo de 60 segundos.

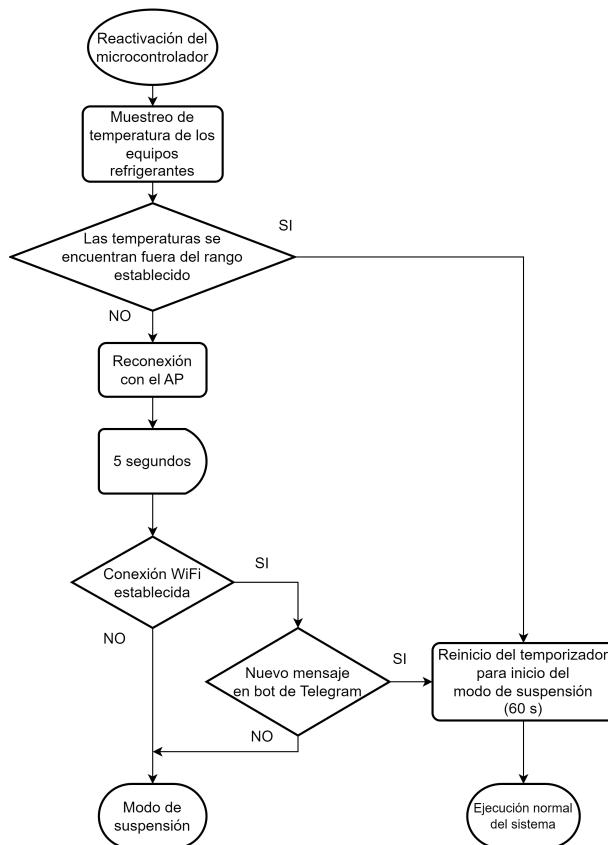


Figura 6.9: Diagrama de flujo de la rutina realizada luego del modo de suspensión

## 6.8. Display

Como se ha mencionado anteriormente, la librería utilizada para la programación del display OLED es U8g2lib.h, la cual nos permite una gran variedad de tipografías de letras y la posibilidad de gráficos

con buena definición. Luego de seleccionar una fuente y tamaño de letras adecuado para la cantidad de pixeles del display, se realizó un algoritmo de varias pantallas para "escribir" la información relevante para el usuario de los diferentes escenarios que podrían ocurrir. Las pantallas se van cargando a medida que van ocurriendo los diferentes acontecimientos y éstas son:

- Pantalla principal: es la que se presenta en un funcionamiento normal, expone los datos de temperatura y humedad de ambos frigoríficos, el estado de conexión WiFi, si el sistema está conectado a una fuente de energía externa o si está usando la batería de respaldo, y si existe alguna alerta. Los datos de temperatura y humedad son actualizados cada vez que se realiza el muestreo.
- Pantallas de alerta: Para cada situación inusual, ya sea, corte de energía eléctrica o temperatura fuera de rango de algún frigorífico.

Al existir una alerta y silenciar el buzzer, en la pantalla principal se visualiza el logo de que existe una alerta y si se presiona el pulsador "FUNCION", el display se carga con la pantalla de alerta correspondiente. Al presionarlo de nuevo, vuelve a la pantalla principal. Esto permanece hasta que la situación atípica se solucione.

- Pantallas de secuencia de testeo: Además, se incluyeron pantallas para cuando se inicia la secuencia de testeo de los periféricos. Este testeo está pensando para cuando se realiza la instalación o mantenimiento del sistema, se activa con un comando del bot de Telegram.

Con la información presentada en el display, se cubren todas las necesidades que podría llegar a tener el usuario y no se disponga de una conexión a WiFi.

## Capítulo 7

# Resultados

### 7.1. Desempeño del protocolo I2C a larga distancia

El sistema de monitoreo estará conformado físicamente, en el momento de instalación, por un gabinete central donde contendrá la electrónica del sistema y los sensores de temperatura y humedad se ubicarán en el interior de las cámaras refrigerantes de los frigoríficos conectados mediante cables hacia la consola central. De manera que se debe prever una longitud de por lo menos 5 metros de los cables que se utilizarán para la conexión con los sensores.

Esto conlleva un problema en lo que respecta a la transmisión de datos mediante el protocolo de comunicación I2C entre el microcontrolador (dispositivo maestro) y los sensores (dispositivo esclavo) dado que, a medida que la longitud del bus aumenta, la capacitancia del mismo también aumenta. La capacitancia representa un inconveniente en este tipo de comunicaciones ya que causa un aumento en los tiempos de subida tanto de las señales de las líneas SDA como las de SCL. Limitando de esta manera la frecuencia de transmisión como así también la cantidad de dispositivos conectados al bus. El valor de capacitancia máximo recomendado para cualquier modo de transmisión por protocolo I2C es de 400 pF [11] para operar con tiempos de subida reducidos y a frecuencia nominal.

Sin embargo, en algunas aplicaciones este valor máximo es excedido, pero existen técnicas para poder hacer frente a este problema. Entre las diferentes técnicas, existe la reducción de la frecuencia de la línea SCL ( $f_{SCL}$ ) de forma de reducir la velocidad de transmisión de datos. De esta manera, se busca cumplir con los tiempos de retención mínimos de los estados lógicos en alto y bajo ( $t_{HIGH}$  y  $t_{LOW}$ , respectivamente) de las líneas del bus. Esta técnica es una de las más favorables ya que solamente se deben efectuar modificaciones de software y no de hardware.

Para determinar la frecuencia de operación máxima se recurre a la Ecuación 7.1. La misma depende de los tiempos de  $t_{HIGH}$  y  $t_{LOW}$  del dispositivo más limitante conectado al bus. Los tiempos  $t_{r(actual)}$  y  $t_{f(actual)}$  representan los tiempos de subida y bajada, respectivamente, que quedan determinados por la constante  $RC$  que posea el bus.

$$f_{SCL(max)} = \frac{1}{t_{HIGH(min)} + t_{LOW(min)} + t_{r(actual)} + t_{f(actual)}} \quad (7.1)$$

En la Tabla 7.1 se indican las especificaciones que se deben cumplir en las señales de las líneas SDA y SCL para lograr el funcionamiento óptimo de los sensores AHT15. De las especificaciones extraídas de

las hoja de datos, no se define los tiempos de subida, pero si los tiempos de retención de estados lógicos en alto y bajo en la linea SCL, los cuales son de 4,7 us y 4 us, respectivamente, para una transmisión estándar de I2C.

Parámetro	Símbolo	I2C Estándar		Unidad
		Mín	Máx	
Frecuencia de la señal SCL	$f_{SCL}$	0	100	kHz
Tiempo en ALTO de la señal SCL	$t_{HIGH}$	4,7	-	us
Tiempo en BAJO de la señal SCL	$t_{LOW}$	4,0	-	us

Tabla 7.1: Especificaciones de tiempo del AHT15 para una transmisión I2C estándar

Para determinar los tiempos de  $t_{r(actual)}$  y  $t_{f(actual)}$  del bus se realizó una prueba en el que se midieron las señales de SDA y SCL mediante un osciloscopio digital. Además, esta prueba permite conocer la capacitancia total del bus y comprobar si se cumplen con los tiempos de retención de los estados lógicos necesarios para los sensores AHT15. Las condiciones con las cuales fue realizado la prueba son las siguientes:

- Dispositivo maestro: ESP8266.
- Dispositivo esclavo: Sensor AHT15.
- Cable de bus: Cable UTP Cat 5e de 5 metros.
- Frecuencia de SCL ( $f_{SCL}$ ): 7 kHz.
- Resistencias pull-up: 10 kΩ.
- Osciloscopio Digital: SIGLENT SDS 1052DL.

### 7.1.1. Determinación del $t_r$ y $t_f$ del bus

Los valores de los tiempos de subida y bajada de las señales SCL quedan definidos por los niveles de tensión en los cuales se consideran los estados lógicos alto y bajo del sensor, asociados a la tensión de alimentación ( $V_{DD}$ ) de 3,3 V. Los niveles de referencia de entrada se establecen como 30 % y 70 % de VDD, es decir, a 0,99 V y 2,31 V, respectivamente. De manera que, para determinar estos tiempos, se deben medir el tiempo que tarda los flancos entre estos niveles de tensión mencionados.

#### Tiempo de subida ( $t_r$ )

Este tiempo se produce en los cambios de los estados lógicos de baja a alta. Para generar el 1 lógico, los dispositivos (maestro o esclavo) ofrecen una elevada impedancia de salida, de manera que el nivel de tensión queda determinado por la forma que se carga la capacidad del bus. En la Figura 7.1 se presenta la captura del flanco de subida de la señal SCL, en que se establece que el tiempo de subida es de 3,4 us.

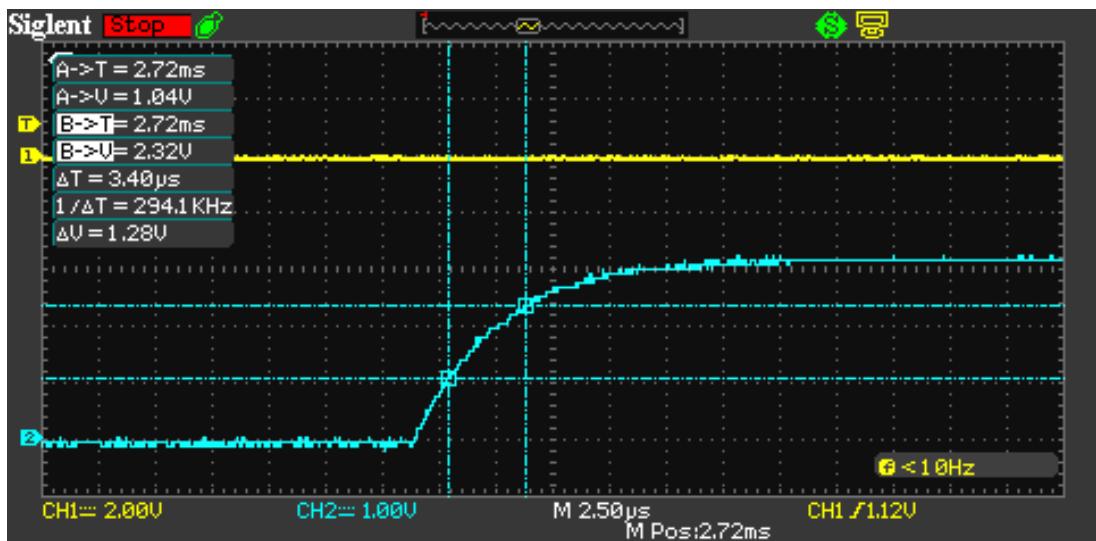


Figura 7.1: Tiempo de subida de la señal SCL

### Tiempo de bajada ( $t_f$ )

Este tiempo se da en los cambios de alta a baja. El tiempo de baja es de menor duración con respecto al tiempo de subida debido a que se produce una rápida descarga de la capacidad concentrada equivalente del bus, a través del transistor del dispositivo, que poseen una resistencia colector-emisor o drenador-surtidor muy reducida. En la Figura 7.2 se presenta la captura del flanco de bajada de la señal SCL, en que se establece que el tiempo de bajada es de 40 ns.

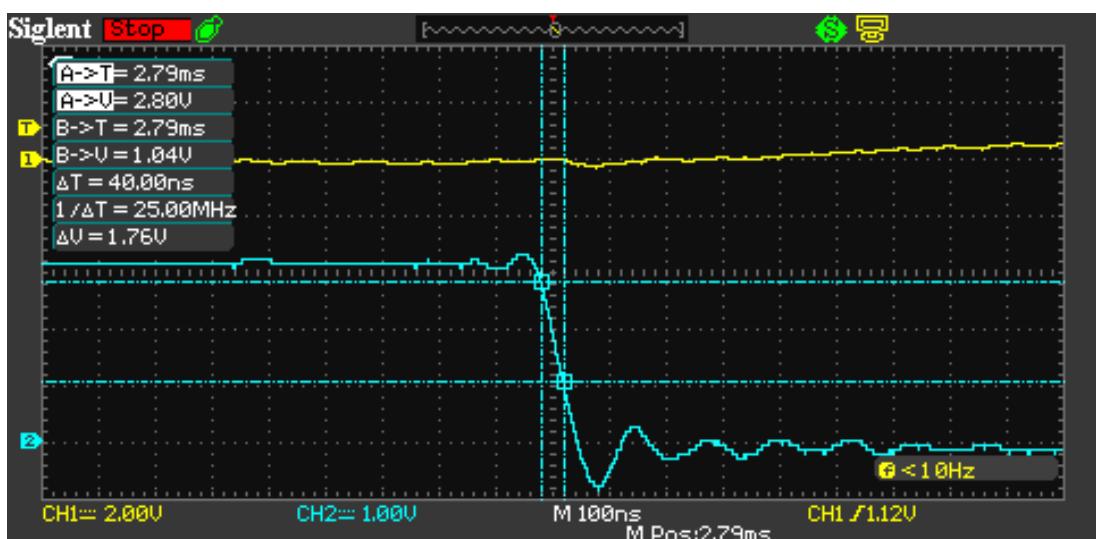


Figura 7.2: Tiempo de bajada de la señal SCL

A partir de los resultados obtenidos, se puede calcular la frecuencia máxima de operación  $f_{SCL}$  utilizando la Ecuación 7.1 y los valores del sensor AHT15 presentados en la Tabla 7.1.

$$\begin{aligned} f_{SCL(max)} &= \frac{1}{t_{HIGH(min)} + t_{LOW(min)} + t_r(actual) + t_f(actual)} \\ &= \frac{1}{4,7\mu s + 4\mu s + 3,4\mu s + 40ns} = 82372,3Hz \end{aligned} \quad (7.2)$$

Esto indica que es posible operar a una frecuencia de operación de hasta 82,3 kHz, siendo un poco menos a la frecuencia de operación para una transmisión estándar de I2C (100 kHz).

### Capacidad total del bus

La determinación de la capacidad del bus de transmisión utilizando protocolo de comunicación I2C es un aspecto crucial para garantizar una transmisión de datos eficiente y confiable. En este contexto, es importante tener en cuenta la resistencia de elevación, que desempeña un papel significativo durante las transiciones de 0 a 1, ya que es la vía de carga de la capacidad concentrada en el bus caracterizada por una curva exponencial. La dinámica de esta carga queda determinado la constante de tiempo ( $\tau$ ) definida por el producto de la resistencia pull-up ( $R_{pu}$ ) y la capacidad ( $C_b$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\tau = R_{pu} * C_b \quad (7.3)$$

Es posible medir el valor de la constante de tiempo  $\tau$  desde el punto que la señal SCL cambia de estado y alcanza un nivel de tensión del 63 % de VDD, es decir, 2,08 V. En la Figura 7.3 se presenta la captura de la señal SCL con los cursores ubicados en dichos niveles de tensión.

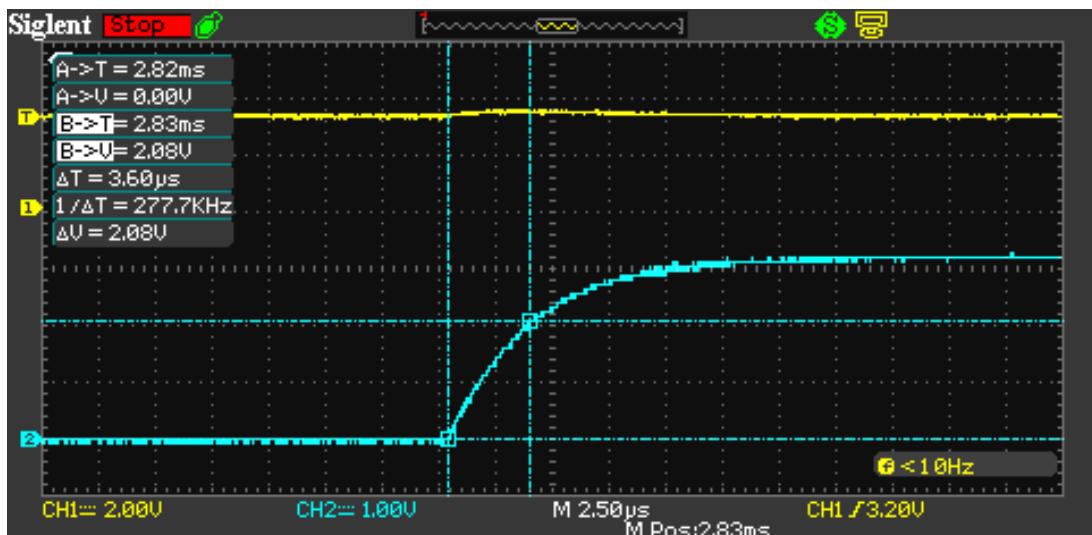


Figura 7.3: Constante de tiempo  $\tau$  medida de la señal SCL

Se observa que la constante de tiempo es de 3,6 us. Teniendo en cuenta que las resistencias pull-up utilizadas son de 10 kΩ, se obtiene la capacidad del bus despejando de la Ecuación 7.3:

$$C_b = \frac{\tau}{R_{pu}} = \frac{3,6\text{us}}{10k\Omega} = 360\text{pF} \quad (7.4)$$

## 7.2. Autonomía del sistema

### 7.2.1. Consumo de corriente durante el modo de suspensión

Para verificar lo analizado en la sección 6.7, acerca de la disminución del consumo de corriente por parte del microcontrolador al implementar los modos de suspensión Light-Sleep, se propone realizar una serie de ensayos para supervisar la corriente demandada por el microcontrolador y registrar las variaciones de carga en las diferentes etapas de funcionamiento del sistema.

La medición se efectuará mediante una resistencia a modo de *shunt*, conectado en serie a los terminales de alimentación del microcontrolador. Mediante un osciloscopio, se conecta la punta de prueba en paralelo al *shunt* para medir la corriente en forma indirecta a partir de los valores de voltaje sobre el mismo aplicando la ley de Ohm ( $I = V/R$ ). El uso del osciloscopio permite realizar un seguimiento de las variaciones ocurridas durante la medición en un intervalo mediante el ajuste de la base de tiempo del instrumento.

Los elementos utilizados para este ensayo son las siguientes:

- Microcontrolador: ESP8266 NodeMCU V3.
- Resistencia Shunt: 1 Ω.
- Osciloscopio Digital: SIGLENT SDS 1052DL.

Cabe aclarar que la resistencia equivalente en los puntos de medición de la punta de prueba, donde se incluye el *shunt*, es de 1,2 Ω. Este valor se empleará para obtener la correspondencia entre los valores de corriente y los valores de voltaje que se observan en el osciloscopio.

En la Figura 7.4 se muestra la gráfica de la corriente en función del tiempo, donde se puede observar el comportamiento del microcontrolador implementando el modo de suspensión Light-Sleep Forzado. Los datos fueron exportados a un archivo CSV del osciloscopio para una visualización más detallada y un análisis más profundo de los resultados.

En la gráfica se distinguen las diferentes fases de funcionamiento del microcontrolador, que corresponden a las tareas realizadas durante la reactivación luego del modo de suspensión, detalladas en la sección 6.7. En la fase 1, al inicio de la reactivación, se observan unos picos de corriente debido al proceso de transmisión del módulo WiFi para la conexión con el AP. Una vez establecida conexión, en la fase 2 nuevamente se observa un serie de picos de corriente correspondiente a la transmisión de datos hacia el servicio de Telegram para verificar la llegada de nuevos mensajes en el bot. Al recibir la información por parte del servidor y constatar, en esta ocasión, la ausencia de nuevas consultas en el bot, el microcontrolador procede a ejecutar el modo de suspensión (fase 3) por un periodo de 10

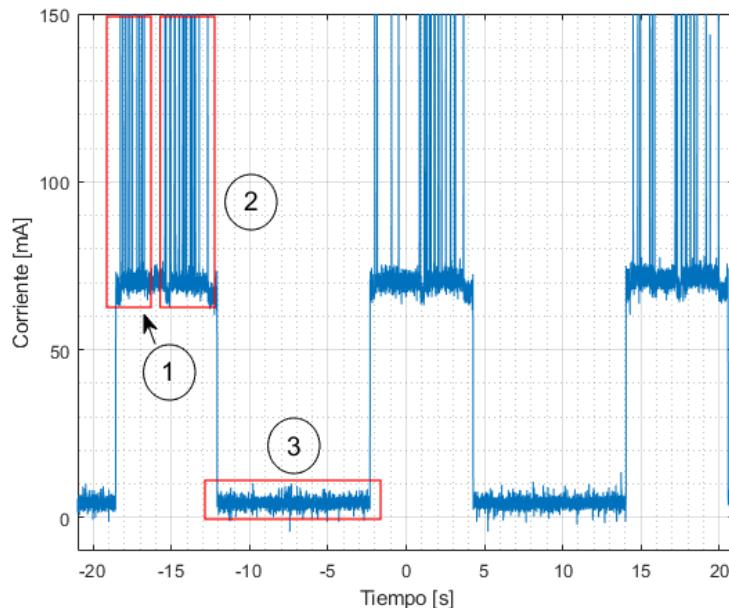


Figura 7.4: Corriente de consumo del microcontrolador con modo de suspensión Light-Sleep Forzado

segundos, antes de iniciar un nuevo ciclo de reactivación. En esta última fase, es notable la drástica disminución del consumo de corriente del microcontrolador durante el modo de suspensión con respecto al del funcionamiento normal, con valores de corriente promedio de 4 mA y 70 mA, respectivamente.

### 7.2.2. Ensayo de monitoreo de tensión

Para evaluar el desempeño del sistema con la batería de Li-Ion como única fuente de alimentación durante al menos 24 horas, se propone realizar un ensayo que consiste en registrar los valores de voltaje de la batería durante dicho periodo. Dada por la relación directa que existe entre el nivel y el voltaje límite de descarga con la capacidad de la batería, es posible conocer la capacidad consumida por el sistema durante un lapso de tiempo y estimar la corriente promedio de consumo del sistema.

#### Circuito adaptador de voltaje

Para el ensayo, se utiliza como adquisidor de datos un Arduino Mega, que tiene integrado el microcontrolador Atmega2560. Este microcontrolador posee un conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits y una memoria no volátil EEPROM de 4096 bytes, los cuales serán utilizados para realizar el muestreo. Por cada muestra, el ADC almacena el resultado 10 bits de la conversión en dos palabras de 8 bits. De estas dos palabras, se almacena en la memoria EEPROM la palabra que contenga los bits de mayor significancia, de manera de obtener una relación de una muestra por cada byte de la memoria y conseguir un aumento de la cantidad de muestras del ensayo.

Esta reducción de bits en la conversión del ADC tiene como consecuencia una reducción en la resolución de los valores de las muestras de 4,88 mV a 19,6 mV para un voltaje de referencia de 5 V. Para compensar esta situación, se propone la implementación del circuito de la Figura 7.5. Este circuito se trata de un adaptador de voltaje basado en un amplificador operacional (AO) LM358 que permite ajustar el rango de variación de voltaje de la batería, aplicado en el terminal no inversor mediante el resistor R1 en configuración pull-down, a un rango más amplio al que opera el ADC.

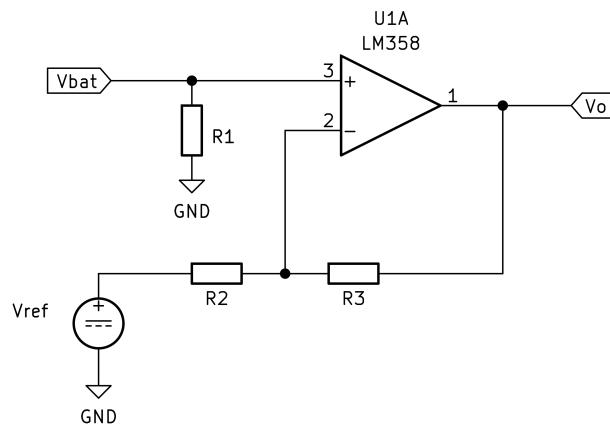


Figura 7.5: Circuito adaptador de voltaje para ensayo de autonomía

Para el rango de voltaje de entrada de 4,3 V a 3,5 V se define un rango de voltaje a la salida del AO de 4,5 V a 2 V, respectivamente. Estos valores permiten mejorar la resolución de las muestras a 6,27 mV.

Aplicando el principio de funcionamiento del AO a lazo cerrado, se puede obtener la ecuación que relaciona el voltaje en el terminal inversor ( $V_-$ ) con el voltaje de entrada ( $V_{Bat}$ ), el voltaje de referencia ( $V_{Ref}$ ) y el voltaje de salida ( $V_{OUT}$ ), expresada en la ecuación 7.5.

$$V_- = V_{Bat} = \frac{V_{OUT} - V_{Ref}}{1 + \frac{R_3}{R_2}} + V_{Ref} \quad (7.5)$$

Despejando el voltaje de referencia de esta ecuación, se obtiene:

$$V_{Ref} = \frac{V_{Bat} - V_{OUT}}{1 + \frac{R_3}{R_2}} + V_{Bat} \quad (7.6)$$

Como  $V_{Ref}$  es constante, es posible igualar las expresiones para las dos casos extremos de voltaje de entrada y resolver la relación entre los resistores R2 y R3:

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{V_{OUT2} - V_{OUT1}}{V_{Bat2} - V_{Bat1}} - 1 = \frac{2V - 4,5V}{3,5V - 4,3V} - 1 = 2,125 \quad (7.7)$$

Reemplazando este valor en la ecuación 7.6, el voltaje para  $V_{Ref}$  debe ser de 4,21 V.

De la relación obtenida en la ecuación 7.7, se selecciona un valor para R2 de 220 kΩ, que da como resultado un valor para R3 de 467,5 kΩ. Se selecciona el valor comercial más cercano de 470 kΩ de la

serie E12. Para el resistor R1 se selecciona el valor de  $100\text{ k}\Omega$  para obtener un consumo de corriente bajo por parte de la batería.

Para estos valores de resistores y el valor de  $V_{Ref}$  calculado, el rango de variación del voltaje a la salida del AO no presenta una diferencia significativa para el mismo rango de variación del voltaje de la batería.

### Resultados del ensayo

El muestreo se realiza en periodos de 30 segundos, lo que equivaldría a una cantidad de 2880 muestras para un lapso de 24 horas. Las condiciones de funcionamiento a la que se realizará el ensayo es con el sistema manteniendo conexión con AP con acceso a internet para habilitar las consultas en forma remota, a través del bot de Telegram, en periodos de una hora. Se utilizó una batería de 2700 mAh, que se cargó completamente antes del inicio ensayo, alcanzando un voltaje final de carga de 4,2 V. Los resultados del ensayo se presenta en la gráfica de la Figura 7.6.

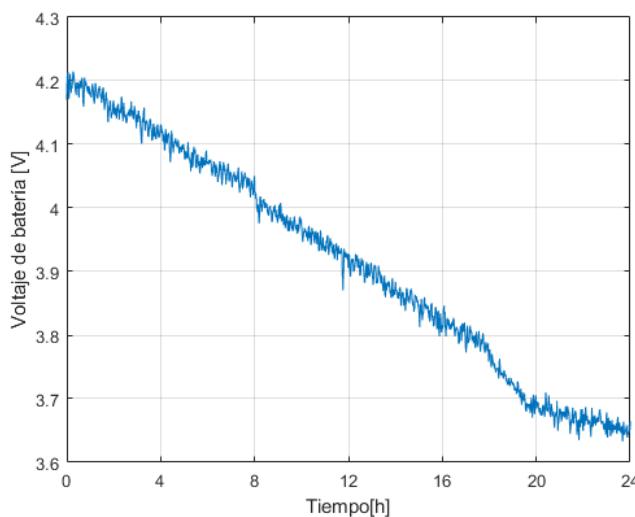


Figura 7.6: Evolución del voltaje de la batería en función del tiempo durante 24 horas

De la gráfica, es posible observar una reducción del voltaje de la batería a una tasa constante a lo largo del tiempo, con una disminución de aproximadamente 26 mV por hora. El voltaje final de la batería luego de 24 horas fue de 3,61 V. Considerando que la capacidad de la batería mencionada y que el EOD, determinado por el circuito de carga, es de 3 V, se estima que la batería consumió 1372,5 mAh durante el ensayo. Esto equivale una corriente de descarga promedio de 57,2 mA, aproximadamente.

### 7.3. Diseño y elaboración de la primera versión del prototipo

Se realizó una versión inicial del proyecto, funcional y estéticamente correcta, considerando una disposición óptima de los componentes montados en el respectivo gabinete buscando ocupar el menor es-

pacio físico posible. Además de la implementación del *hardware*, también se realizó el bot de Telegram al cual se puede consultar los datos de temperatura y humedad, cambiar valores umbrales máximos y mínimos, y silenciar alarmas en caso de que existiesen.

### 7.3.1. Diseño de PCB y montaje

El diseño del PCB fue hecho en el paquete de software libre *KiCad*. A continuación, se presenta el esquemático correspondiente al sistema.

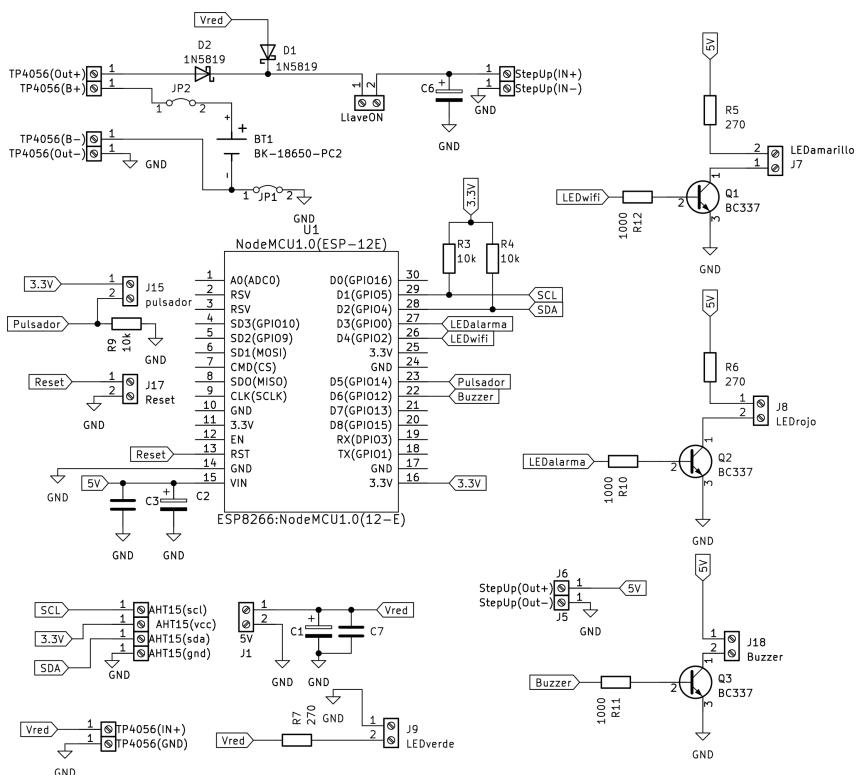


Figura 7.7: Circuito completo de la primera versión del sistema

Para esta primera versión, se implementó el uso de solamente un sensor AHT15, ya que era suficiente para el lugar donde se realizaron las pruebas de funcionamiento del prototipo. El sistema cuenta con todos los LEDs indicadores, es decir, si hay energía eléctrica (azul), el de conexión a una red WiFi (verde) y el de alarma (rojo). También, cuenta con el pulsador multifunción que permite entrar en la configuración del módulo de WiFi del microcontrolador, silenciar el *buzzer* o testear todos los componentes del sistema. Además, se instaló una llave para cortar la energía del sistema, ya sea si proviene de la red eléctrica o de la batería interna. Otra cuestión que debemos mencionar es la colocación de pines para realizar mediciones de consumo de la batería, con el propósito de lograr ensayos de auto-

nomía sencillos y precisos. El software de diseño nos permite lograr una vista 3D del PCB, figura que presentamos a continuación en conjunto con el circuito diseñado.

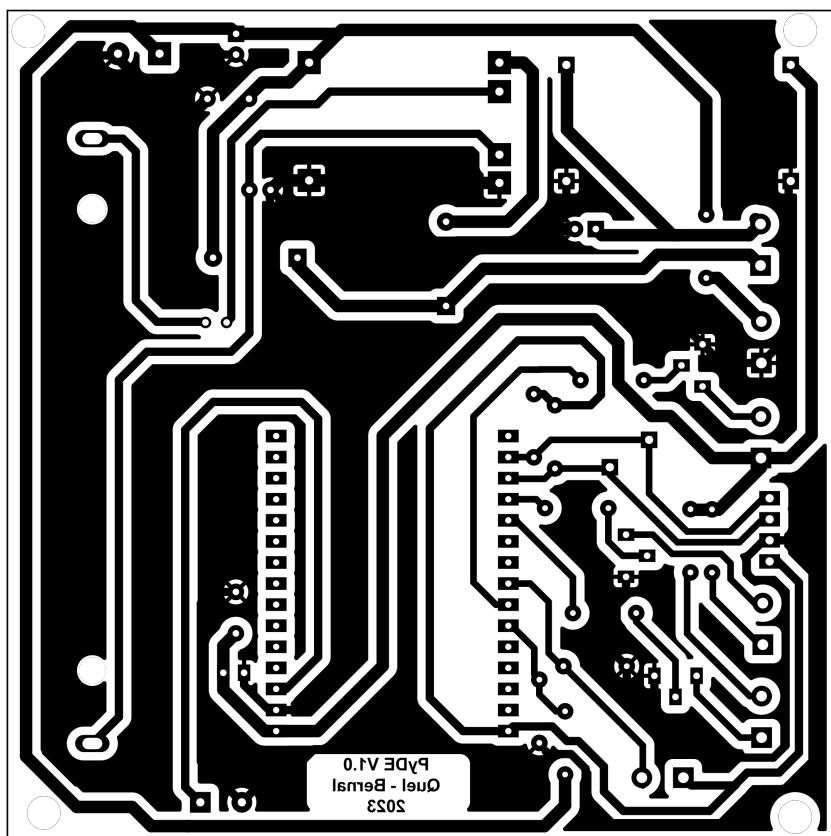


Figura 7.8: Vista inferior del PCB



Figura 7.9: Vista 3D de la placa

La placa tiene un tamaño de 10cm x 10cm, y se tuvo en cuenta los encapsulados correspondientes a cada componente para lograr una correcta disposición física de los mismos. Se utilizó una caja estanca de PVC de 15cm x 11cm x 8cm, tamaño adecuado para lograr una buena disposición de los elementos. Además, se incluyó como medida de seguridad adicional un fusible de 2A entre la red eléctrica y la entrada de la fuente *switching*. Seguidamente, se exponen fotografías del gabinete.



Fotografía 7.1: Vista exterior del gabinete



Fotografía 7.2: Vista interior del gabinete

### 7.3.2. Interfaz de Telegram

En conjunto al montaje del sistema, se configuró una interfaz de Telegram acorde a las consideraciones de diseño de esta primer versión. Donde los usuarios registrados tendrán la posibilidad de consultar la temperatura y humedad de un frigorífico, silenciar la alarma, cambiar los umbrales de temperatura máxima y mínima, o iniciar una secuencia de testeos del sistema.

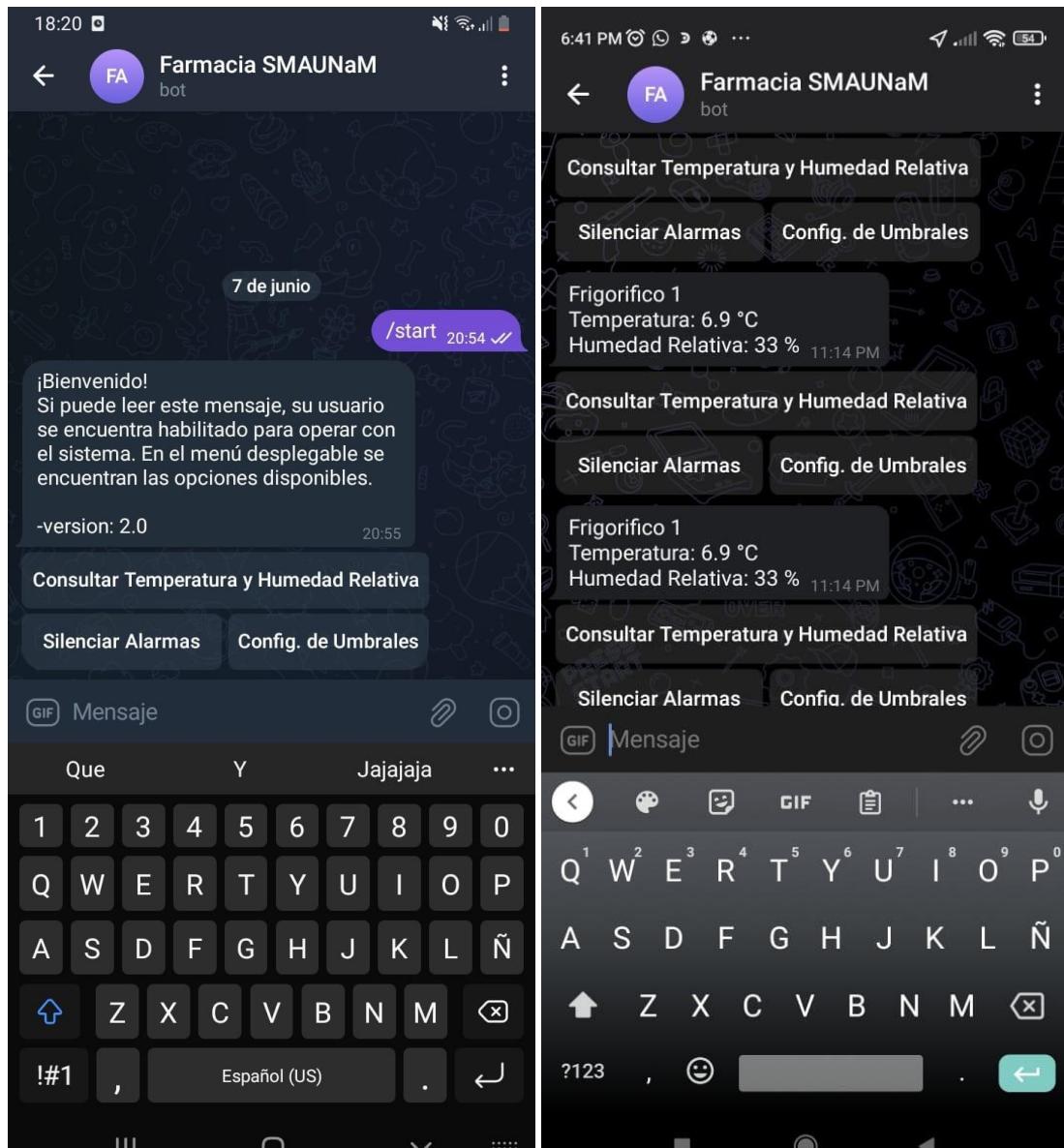


Figura 7.10: Interfaz de usuario del bot de Telegram(1)

El bot tiene un mensaje de bienvenida al iniciarse, el cual es recibido si el ID del usuario está habilitado para usarlo. Luego, ya se puede empezar a realizar consultas como se observa en la figura 7.10b.

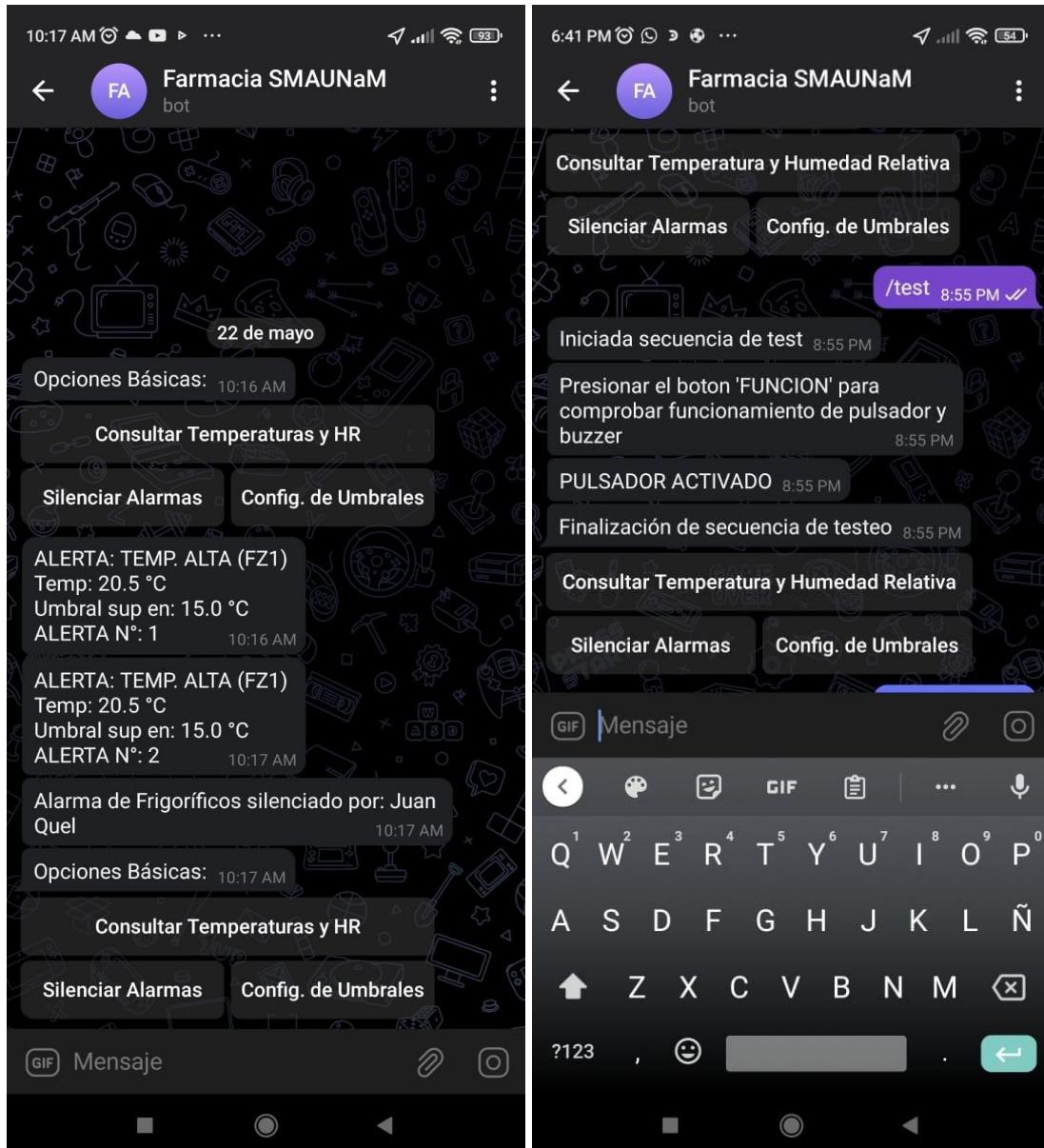


Figura 7.11: Interfaz de usuario del bot de Telegram(2)

En el caso de que se active la alarma, envía el mensaje de alerta a todos los usuarios que iniciaron la comunicación con el bot y muestra al que lo silenció. Si la alarma no es apagada continúa enviando el mensaje de alerta cada un intervalo de tiempo. Además, con el bot es posible iniciar la secuencia de

testeo, enviando mensajes guías para las pruebas del usuario.

## 7.4. Diseño y elaboración de la versión final

A partir de los resultados obtenidos con la versión inicial del prototipo, se logró realizar la versión final con todos los componentes seleccionados para el sistema completo. Con el montaje de dos sensores AHT10 y el display SSD1306, utilizando el protocolo de comunicación I2C. En esta versión, también se debe resaltar el uso de componentes de montaje superficial (SMD) para optimizar el espacio físico de la placa electrónica. El bot de Telegram es el mismo que se utilizó para la versión anterior, con la salvedad de que expone los datos de 2 frigoríficos y mejoras estéticas para una mejor experiencia del usuario. Se logró realizar una placa de dimensiones más pequeñas que la primera versión, pero de doble faz. En el frente se ubican los LEDs, el pulsador "FUNCIÓN" el display, y en la parte posterior se ubicaron el microcontrolador, la fuente step-up, el módulo de carga de la batería, el buzzer y demás componentes. Además, se realizó el diseño de un gabinete específicamente para este propósito para luego imprimirla con una impresora 3D.

### 7.4.1. Elaboración y diseño del PCB

El PCB fue diseñado en el mismo software usado anteriormente, KiCAD. Como se mencionó, es una placa de doble faz y se utilizaron componentes de montaje superficial, buscando el objetivo de reducir el espacio físico que ocupa la placa y las demás partes del sistema. Se debe resaltar la utilización de los siguientes componentes SMD:

- Resistores de 1/4W.
- Transistores BJT NPN BC817: estos transistores son equivalentes a transistores BJT NPN BC337.

También, en esta versión final de la placa se optó por utilizar 5 conectores JST para una mejor conexión de los periféricos del sistema (sensores, buzzer y LEDs).

En la vista anterior (vista del observador de frente a la placa) de la placa se ubicaron los periféricos que constituyen a la interfaz del usuario. Estos son:

- LEDs indicadores.
- Display OLED.
- Pulsador multifunción.

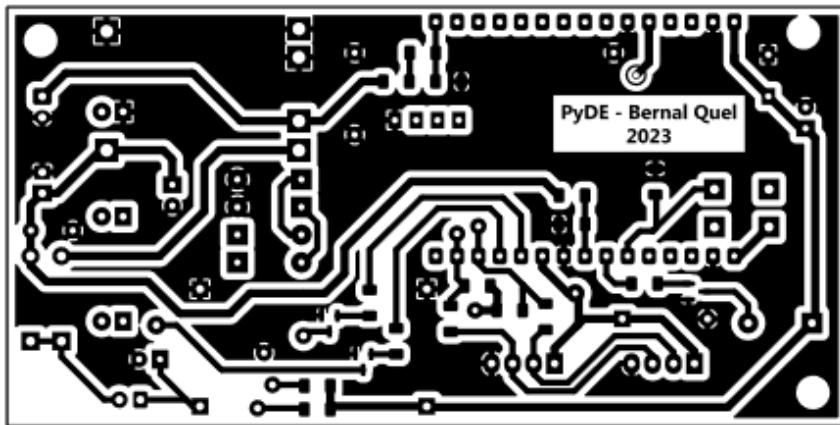


Figura 7.12: Capa de cobre de la vista anterior del PCB

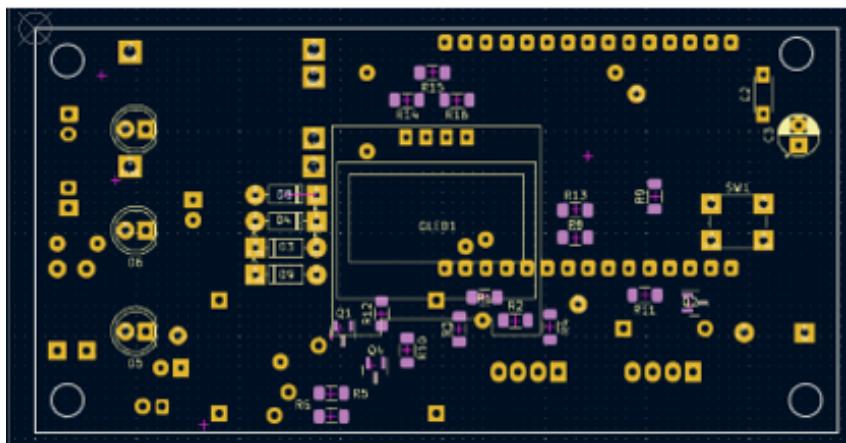


Figura 7.13: Dispocion de componentes de la vista anterior del PCB

Persiguiendo el objetivo de una mejor organización del PCB, en la parte posterior de la placa se encuentran las demás partes del sistema que no harían a la interfaz de usuario del gabinete propiamente dicho. Se situaron en la parte posterior entonces los siguientes elementos:

- La placa NodeMCU V3 (ESP8266).
- El módulo de carga de la batería.
- La fuente step up.
- Los conectores JST para los periféricos.
- El buzzer.

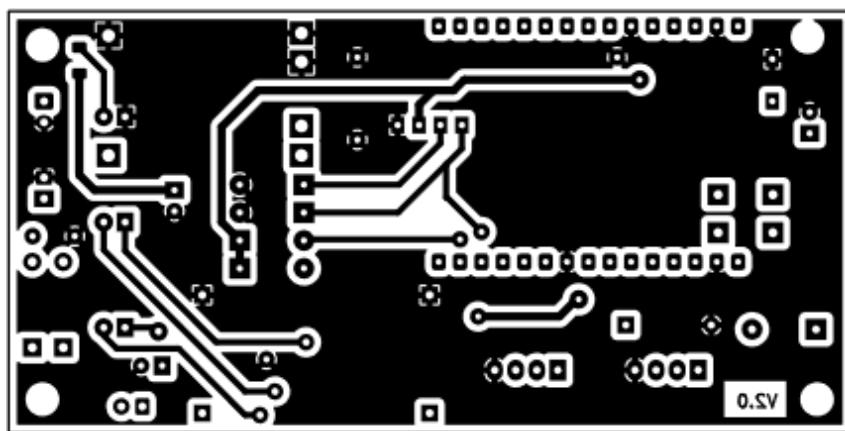


Figura 7.14: Capa de cobre de la vista posterior del PCB

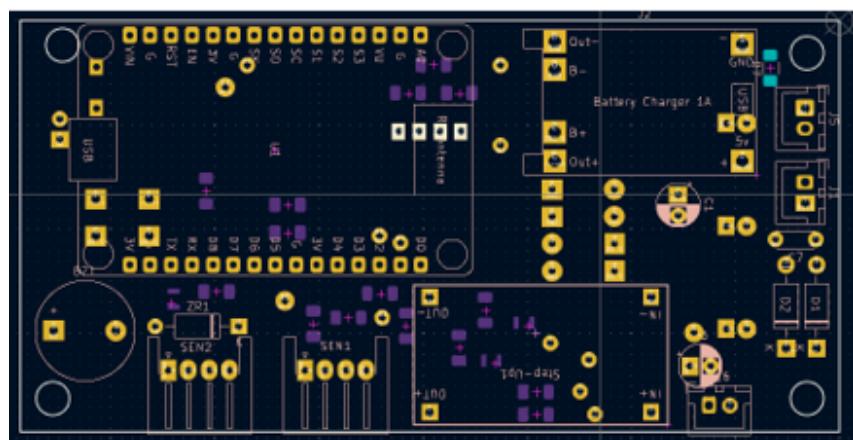


Figura 7.15: Dispoción de componentes de la vista posterior del PCB

Las dimensiones de la placa que se pudo realizar es de 100 mm x 50 mm, dimensiones más pequeñas que la primera versión por lo que usa un espacio físico más óptimo del gabinete..

#### 7.4.2. Elaboración y diseño del gabinete

El gabinete fue diseñado y modelado en el software FreeCAD. La ventaja de usar esta aplicación es que es un modelador 3D paramétrico de código abierto creado principalmente para diseñar objetos de la vida real de cualquier tamaño. El modelado paramétrico le permite modificar fácilmente su diseño volviendo al historial de su modelo y cambiando sus parámetros. Para este proyecto, el gabinete diseñado es dependiente del tamaño de:



Capítulo 8

## **Conclusiones**



# Bibliografía

- [1] R. D. S. Santos y O. M. C. Rodríguez, «Estudio comparativo sobre el cumplimiento de la declaración de temperatura y humedad relativa en las etiquetas de los envases primarios y secundarios de productos farmacéuticos en farmacias comunitarias privadas del Ensanche Naco Distrito Nacional y el Sector La Toronja Santo Domingo Este Período junio 2019-enero 2020,» Tesis doct., Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, 2021.
- [2] «ANMAT: Disposición N° 3475/2005.» (2005), dirección: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/disposici%C3%B3n-3475-2005-107238/texto>. (Accedido: 12/06/2023).
- [3] K. M. Alsante, A. Ando, R. Brown et al., «The role of degradant profiling in active pharmaceutical ingredients and drug products,» 2006.
- [4] S. Bajaj, D. Singla y N. Sakhuja, «Stability Testing of Pharmaceutical Products,» *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2012.
- [5] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi y M. A. y M. Ayyash, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies Protocols and Applications,» *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, n.º 4, págs. 2347-2376, 2015.
- [6] L. Atzori, A. Iera y G. Morabito, «The Internet of Things: A Survey,» *Computer Networks*, vol. 54, n.º 15, págs. 2787-2805, 2010.
- [7] Gubbi, R. Buyya, S. Marusic y M. Palaniswami, «Internet of Things (IoT): A Vision and Architectural Elements and Future Directions,» *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n.º 29, págs. 1645-1660, 2013.
- [8] «Telegram.» (2021), dirección: <https://www.telegram.org/faq>. (Accedido: 12/06/2023).
- [9] J. Antoni, «Telegram Bots for IoT Enabled Devices,» *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 3, n.º 1, págs. 36-40, 2020.
- [10] B. Linke, *Overview of 1-Wire Technology and Its Use*, Maxim Integrated, 2008. dirección: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/guide-to-1wire-communication--maxim-integrated.pdf>, (Accedido: 9/5/2023).
- [11] *I2C-bus specification and user manual*, NXP Semiconductors, 2021. dirección: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>, (Accedido: 9/5/2023).
- [12] *Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Drive*, HD44780U, HITACHI Semiconductor.

- [13] *Remote 8-bit I/O expander for I2C-bus with interrupt*, PCF8574; PCF8574A, Rev. 5, NXP Semiconductors, mayo de 2013.
- [14] *128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*, SSD1306, Rev. 1.1, SOTON SYSTECH, abr. de 2008.
- [15] CFAH1602A-AGB-JP, Crystalfontz America, Inc.
- [16] *OLED SPECIFICATION*, WEA012864D-03, WINSTAR.
- [17] *Arduino® MKR WiFi 1010*, MKR WiFi 1010, Rev. 3, Arduino, sep. de 2022.
- [18] *ESP8266EX Datasheet*, ESP8266, Rev. 7.0, ESPRESSIF, jun. de 2023.
- [19] *ESP8266EX Datasheet*, ESP8285, Rev. 2.3, ESPRESSIF, jun. de 2023.
- [20] *ESP32 Series Datasheet*, ESP32, Rev. 4.3, ESPRESSIF, jul. de 2023.
- [21] *MT3608 High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter*, MT3608, V. 1.0, Aerosemi Technology Co.
- [22] B. Chu, *Selecting the Right Battery System For Cost-Sensitive Portable Applications While Maintaining Excellent Quality*, AN1088, Microchip Technology Inc., 2007. dirección: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/AN1088-App-Note-0001088.pdf>.
- [23] H. A. Kiehne, *BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK*, 2.<sup>a</sup> ed. Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [24] *A Standalone Linear Li-lon Battery Charger with Thermal Regulation*, TP4056, Rev 2.0, Top Power ASIC. dirección: <http://toppwr.com/uploadfile/file/20230304/640301eae1260.pdf>.
- [25] *One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC transceiver*, DW01-P, Rev. 1.6, Fortune, abr. de 2016. dirección: [https://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P-DS-16\\_EN\\_56033.pdf](https://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P-DS-16_EN_56033.pdf).
- [26] *Dual N-Channel Enhancement Mode Power MOSFET*, FS8205A, Rev. 1.2, Fortune, ago. de 2009. dirección: [http://www.ic-fortune.com/upload/Download/FS8205A-DS-12\\_EN.pdf](http://www.ic-fortune.com/upload/Download/FS8205A-DS-12_EN.pdf).
- [27] «Librerías para C++», Include Poetry. (2020), dirección: <https://www.include-poetry.com/Code/C%2B%2B/Introduccion/Librerias/>. (Accedido: 18/07/2023).
- [28] «ESP8266 Pinout Reference: Which GPIO pins should you use?» Random Nerds Tutorial. (), dirección: <https://randomnerdtutorials.com/esp8266-pinout-reference-gpios/>. (Accedido: 19/07/2023).
- [29] Dirk O. Kaar, *arduino-esp8266/wifioff*, ver. 3.1.2, 15 de sep. de 2023. dirección: <https://github.com/dok-net/arduino-esp8266/tree/wifioff>.

## Apéndice A

# Creación de bot en Telegram

En este anexo se enseña de forma gráfica y detallada cómo crear un bot en Telegram.

1. Acceder a la aplicación de Telegram desde cualquier dispositivo que la tenga instalada.
2. Iniciar la conversación con BotFather.
  - a) Dirigirse al cuadro de búsqueda de Telegram.
  - b) Introducir “BotFather” y seleccionar la opción BotFather (la primera opción) para iniciar una conversación.

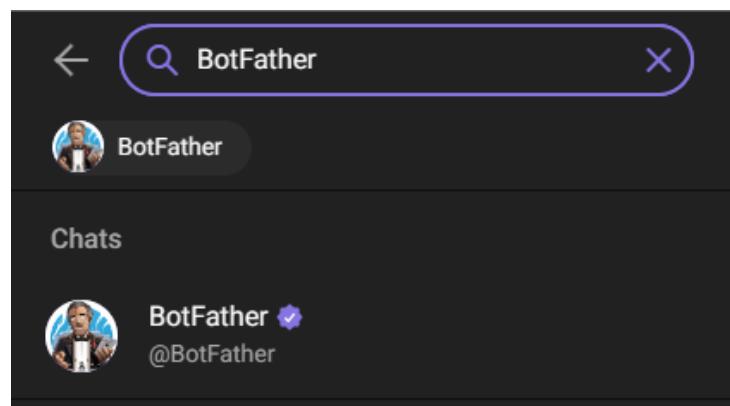


Figura A.1: Búsqueda de BotFather en el buscador de Telegram

Al pulsar en BotFather, Telegram automáticamente abrirá un espacio de conversación para la configuración del bot.

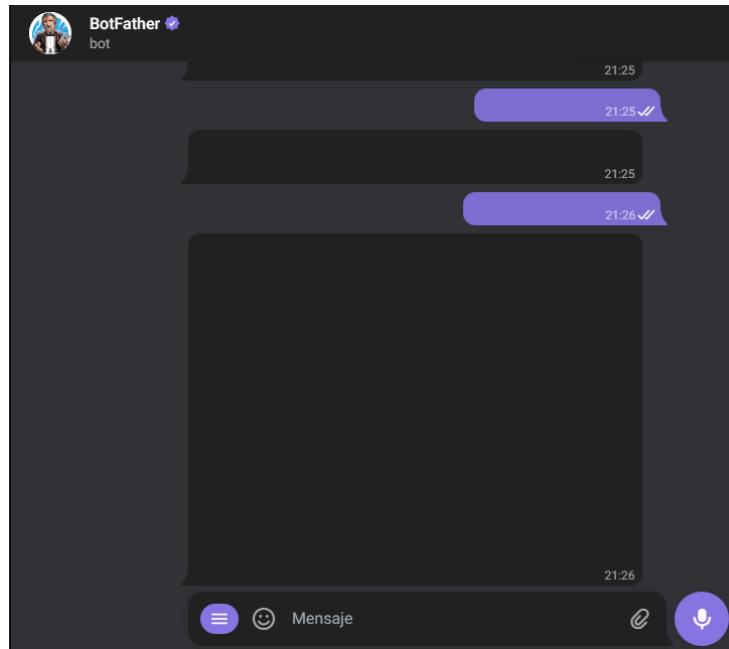


Figura A.2: Espacio de conversación con BotFather

3. Proporcionar toda la información para la creación del bot mediante las indicaciones que mencione BotFather.

- Escriba el comando  
newbot para la iniciar el proceso de creación de un nuevo bot.

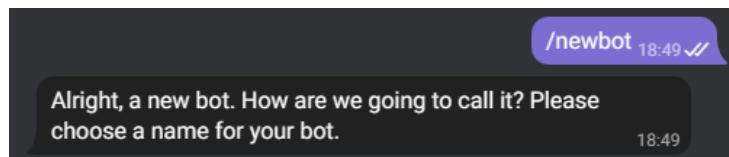


Figura A.3: Inicio de creación de bot

- BotFather le pedirá que ingrese un nombre para el bot. Este nombre es que se mostrará en los detalles del contacto y en otros lugares. El nombre puede contener cualquier carácter y no tiene que ser único.

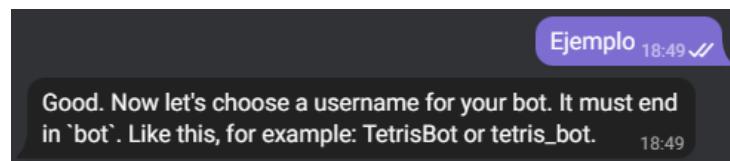
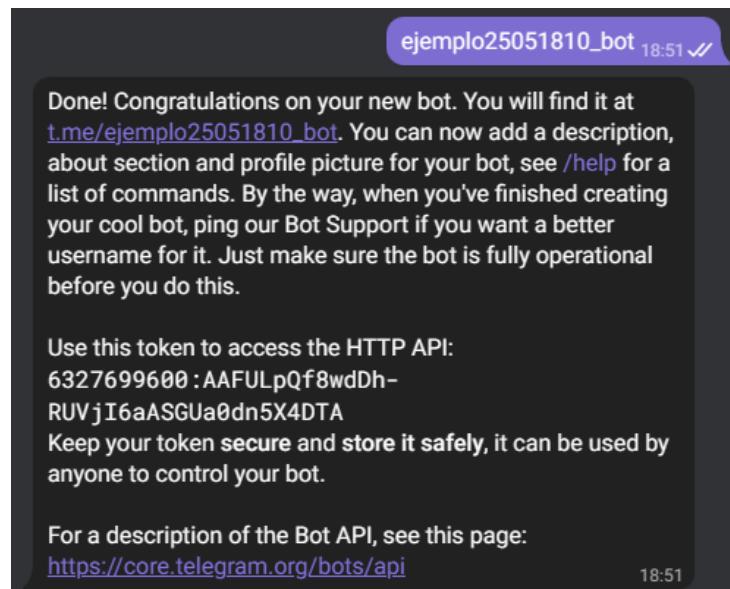


Figura A.4: Ingreso de nombre del bot

- c) Luego le pedirá el ingreso de un *username* que debe ser único. Este debe ser corto (de 5-32 caracteres), en el que se podrán incluir solamente caracteres latinos, números y guiones bajos. Además, debe terminar con la palabra 'bot'.

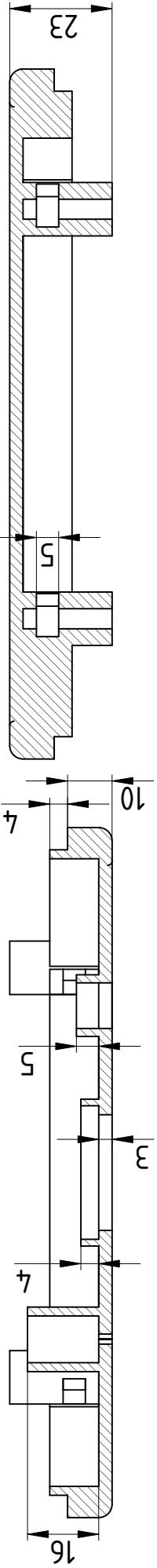
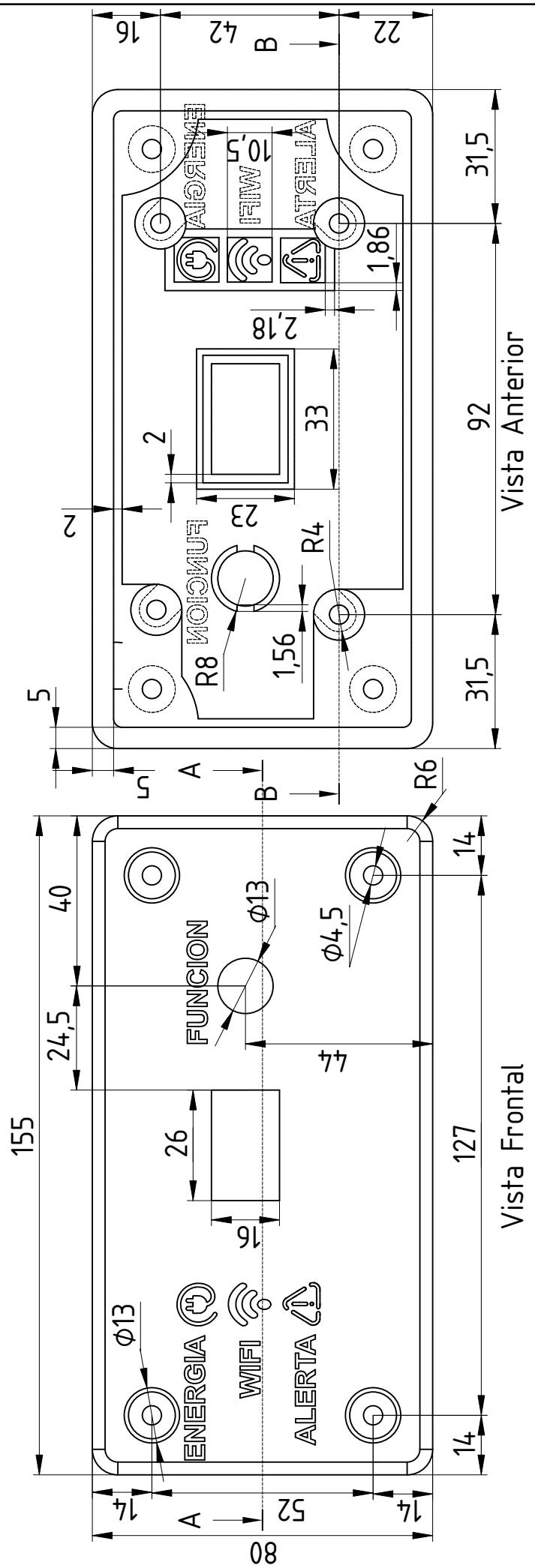
Figura A.5: Ingreso de *username* del bot

- d) Si los datos ingresados son válidos, el BotFather confirmará la creación del bot y proporcionará el enlace para iniciar una conversación con él y el *token* para acceder al bot a través de la API HTTP de Telegram. Con el *token* es un código privado para obtener acceso al bot para realizar modificaciones o enlazarlo a otros servicios, entre otras funciones. Se lo debe guardar de forma segura ya que con él, cualquiera puede tomar el control del bot.



Apéndice B

## **Gabinete: Dimensiones**



Sección B-B

Created by: <b>Bernal - Quel</b>	Title: <b>Tapa de gabinete</b>	Size: <b>A4</b>	Sheet: <b>1/3</b>	Scale: <b>3:4</b>
Supplementary information:		Part number: <b>1</b>	Drawing no.: <b>1</b>	
<b>Dimensions</b>			Date: <b>28/10/2023</b>	Revision: <b>REV A</b>
				

