



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT DE BAJO COSTO PARA
EL MONITOREO Y LA TRAZABILIDAD EN EL
ALMACENAMIENTO DE VACUNAS BOVINAS***

Ariel Joaquín Vergara

Trabajo final de Ingeniería Mecatrónica

Director

Juan Pablo Demichelis

Codirector

Federico Luis Pinna González

Asesor

José Emanuel Fernández

Villa Mercedes, San Luis

2026

DERECHO DE AUTOR

© 2026, Ariel Joaquín Vergara.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Es mi más profundo deseo dedicar este trabajo a quienes, de una u otra forma fueron parte esencial de este camino.

A mis padres, Horacio y Patricia, cuyo esfuerzo y sacrificio a lo largo de estos años hicieron que mi única preocupación fuera el estudio. Por ello y por todo lo que representan, les estaré eternamente agradecido.

A mis hermanos, Lourdes y Facundo, por su apoyo incondicional en cada etapa de este camino y por estar siempre presentes, sin importar la distancia.

A mis abuelos Carlos y Josefa, por guiarme siempre con su sabiduría y apoyarme desde el cielo.

A mi novia Candela, por su presencia constante, su paciencia y su apoyo incondicional durante estos años.

A mis compañeros y amigos, quienes fueron uno de los pilares fundamentales de esta etapa y con quienes compartí los momentos más importantes de mi carrera y vida.

A mis profesores del colegio secundario, Silvina Marín y Nicolás Di Giambattista, por despertar en mí el interés por la ciencia y la ingeniería y por ser parte del origen de este camino.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la universidad pública, gratuita y de calidad, en particular a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis, por haber sido mi casa de estudios durante todos estos años y por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional.

Agradezco también a cada uno de los docentes que me acompañaron a lo largo de esta etapa y de manera especial a mi director, Juan Pablo Demichelis, a mi codirector, Federico Pinna González y a mi asesor por parte de SENASA José Emanuel Fernández, por su orientación, dedicación y compromiso durante el desarrollo del presente trabajo. Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, estuvieron presentes en este camino: familiares, amigos, compañeros de trabajo y conocidos que con su apoyo cotidiano, fueron parte fundamental de este logro.

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó y fabricó el prototipo de un dispositivo IoT de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de la temperatura de heladeras de almacenamiento de vacunas contra la Aftosa y la Brucelosis destinadas a ganado bovino, con fines de trazabilidad y control de la cadena de frío. El desarrollo respondió a las limitaciones del sistema de registro manual actualmente empleado, el cual no permite detectar tempranamente los desvíos térmicos ni garantizar un respaldo continuo de la información. El dispositivo se construyó en torno a un microcontrolador ESP32-C3 Super Mini, una sonda digital sumergible DS18B20 y un módulo de respaldo energético.

Para su operación se definió una arquitectura de datos escalable basada en el protocolo MQTT, procesamiento en Node-RED, almacenamiento en InfluxDB y visualización en Grafana, con todos los servicios desplegados sobre contenedores Docker. Sobre esta base se desarrolló una plataforma de monitoreo remoto que permitió el seguimiento simultáneo de una o múltiples heladeras mediante un esquema de codificación cromática, junto con un firmware capaz de almacenar datos localmente ante cortes de conectividad, transmitirlos periódicamente y activar alarmas ante temperaturas fuera del rango de 2°C a 8°C establecido por SENASA, generando además reportes automáticos de trazabilidad en formato PDF.

La fabricación del prototipo abarcó el diseño de la placa de circuito impreso, desarrollada en EasyEDA y fresada mediante un equipo CNC, así como el modelado del gabinete en Fusion 360, materializado mediante impresión 3D e incorporando fijación magnética para su instalación directa sobre la superficie de las heladeras. El ensamble final integró todos los componentes electrónicos en un dispositivo compacto, robusto y de fácil montaje.

El sistema se sometió diversas pruebas en condiciones representativas de uso real, demostrando un desempeño confiable y estable frente a interrupciones de conectividad, cortes de suministro eléctrico y excursiones térmicas fuera del rango admisible. Los resultados obtenidos, junto con el bajo costo alcanzado en su fabricación, confirmaron la viabilidad técnica y económica del dispositivo como una solución escalable, sentando las bases para una posible implementación futura en conjunto con SENASA.

Palabras clave - Aftosa, Brucelosis, Cadena de frío, Ganado bovino, IoT, Monitoreo remoto, SENASA, Trazabilidad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: Propuesta	11
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 Alcances y limitaciones	13
1.4 Marco teórico	14
1.4.1 Fiebre aftosa	14
1.4.2 Brucelosis	15
1.4.3 Internet de las cosas IoT	15
1.4.4 Dispositivos IoT	16
1.4.5 Protocolo de conexión.....	16
1.4.6 Bases de datos	16
1.4.7 Cadena de frío	17
1.4.8 Estatus sanitario libre de enfermedad	17
1.5 Análisis del estado del arte	18
1.5.1 Estatus sanitario de Argentina, aftosa	18
1.5.2 Refrigeradores utilizados para almacenamiento de vacunas bovinas.....	19
1.5.3 Sistema de trazabilidad actual.....	20
1.5.4 Precedentes.....	21
2 CAPÍTULO 2: Análisis y Desarrollo	22
2.1 Diseño del dispositivo IoT	22
2.1.1 Selección de componentes principales	22
2.1.1.1 Microcontrolador.....	23
2.1.1.2 Sonda de temperatura.....	24

2.1.1.3	Módulo de carga UPS	25
2.1.1.4	Display OLED.....	26
2.1.1.5	Batería	26
2.1.2	Diseño de placa PCB	27
2.1.3	Diseño del gabinete	29
2.2	Diseño de la arquitectura de datos.....	32
2.2.1	Protocolo de transmisión de datos	34
2.2.2	Node-RED.....	34
2.2.3	Base de datos	35
2.2.4	Grafana.....	35
2.3	Plataforma de monitoreo en Grafana	36
2.3.1	Sección Inicio.....	36
2.3.2	Sección 1: Vista Global	36
2.3.3	Sección 2: Vista General.....	37
2.3.4	Sección 3: Reportes.....	38
2.4	Firmware y lógica del sistema	39
3	CAPÍTULO 3: Fabricación y puesta en marcha	43
3.1	Fabricación de placa PCB.....	43
3.1.1	Selección de fresas.....	43
3.1.2	Generación del G-code y Configuración del Mecanizado	44
3.1.3	Proceso de Fresado.....	45
3.1.4	Soldado de componentes en placa PCB	46
3.2	Fabricación del gabinete	47
3.3	Ensamble del dispositivo.....	49
3.4	Puesta en marcha	51
4	CAPÍTULO 4: Resultados Obtenidos	53

4.1	Disponibilidad de datos del sistema	53
4.2	Validación del sensor	54
4.3	Autonomía del sistema ante corte de suministro eléctrico	54
4.4	Respuesta ante alarmas	55
4.4.1	Simulación 1: Exposición al límite inferior de temperatura.....	55
4.4.2	Simulación 2: Exposición al límite superior de temperatura.....	56
4.5	Generación de reportes automáticos	58
5	CAPÍTULO 5: Análisis de costos	59
5.1	Costo de hardware del dispositivo.....	59
5.2	Costos de fabricación.....	60
5.3	Costos de infraestructura	60
5.3.1	Infraestructura actual	60
5.3.2	Infraestructura proyectada	61
5.4	Estimación del tiempo de ensamblado.....	62
6	CAPÍTULO 6: Mejoras futuras y Conclusiones	63
6.1	Mejoras futuras	63
6.2	Conclusión	63
7	Referencias Bibliográficas	65
8	Anexo/s	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vías de transmisión de aftosa, tomado de [1]	14
Figura 1.2 Síntomas clínicos de la brucelosis, tomado de [3]	15
Figura 1.3 Mapa de estatus oficial aftosa, tomado de [9]	18
Figura 1.4 Zonas libres de aftosa en Argentina, tomado de [9]	19
Figura 1.5 Refrigeradores utilizados, fuente propia.	20
Figura 1.6 termómetros utilizados, fuente propia.	20
Figura 1.7 Tabla de trazabilidad actual, fuente propia	21
Figura 2.1 Arquitectura general propuesta para el sistema IoT	22
Figura 2.2 ESP 32-C3 Super Mini	23
Figura 2.3 Sonda DS18B20	25
Figura 2.4 Módulo de carga UPS	25
Figura 2.5 Display OLED SH1106	26
Figura 2.6 Pruebas en protoboard	27
Figura 2.7 Esquema de conexiones en EasyEDA	28
Figura 2.8 Layout de la placa PCB	29
Figura 2.9 Diseño 3D carcasa + tapa	30
Figura 2.10 Análisis de secciones - Encastres	31
Figura 2.11 Diseño 3D del ensamble final	32
Figura 2.12 Diagrama de arquitectura	33
Figura 2.13 configuración de bloques en Node-RED	34
Figura 2.14 Ventana de inicio – Plataforma de monitoreo	36
Figura 2.15 Vista global – Plataforma de monitoreo	37
Figura 2.16 Vista general – Plataforma de monitoreo	38
Figura 2.17 Reportes – Plataforma de monitoreo	39
Figura 2.18 Diagrama de arranque y configuración	39

Figura 2.19 Interfaz de configuración Wi-Fi	40
Figura 2.20 Diagrama principal y operativa continua	42
Figura 3.1 Mini fresadora CNC	43
Figura 3.2 Fresas seleccionadas	44
Figura 3.3 Configuración y ajustes de fresado en FlatCAM	45
Figura 3.4 Proceso de fresado CNC de la placa PCB.....	46
Figura 3.5 Soldado de componentes en placa PCB	47
Figura 3.6 Impresora 3D Bambulab A1 Combo	48
Figura 3.7 Laminado en BambuStudio	48
Figura 3.8 Gabinete impreso en 3D.....	49
Figura 3.9 Ensamble del dispositivo	50
Figura 3.10 Resultado final del dispositivo ensamblado	51
Figura 3.11 Fijación magnética del dispositivo	51
Figura 3.12 Sonda en bulbo húmedo y encendido.....	52
Figura 4.1 Dispositivo en estado Alerta - Límite negativo	48
Figura 4.2 Interfaz en estado Alerta – Rango negativo	56
Figura 4.3 Dispositivo en estado Alerta - Límite positivo.....	57
Figura 4.4 Interfaz en estado Alerta – Rango positivo	57
Figura 4.5 Reportes de trazabilidad automáticos.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Factores ponderados - Microcontrolador	23
Tabla 2.2 Tiempo de autonomía offline	24
Tabla 4.1 Disponibilidad de datos del sistema	53
Tabla 4.2 Validación del sensor.....	54
Tabla 4.3 Validación ante cortes	54
Tabla 5.1 Costos de hardware.....	59
Tabla 5.2 Costos de fabricación	60
Tabla 5.3 Costos de infraestructura actual	61
Tabla 5.4 Costos de infraestructura proyectada	61
Tabla 5.5 Tiempos estimados de ensamblado	62

CAPÍTULO 1: Propuesta

1.1 Introducción

La sanidad animal es uno de los pilares fundamentales para la producción ganadera argentina. En particular, el control de la fiebre aftosa y la brucelosis bovina constituye una obligación sanitaria establecida por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA), que exige la vacunación sistemática de la totalidad del rodeo bovino en la mayor parte del territorio nacional. La eficacia de estas campañas depende, de manera crítica, del correcto mantenimiento de la cadena de frío durante el almacenamiento de las vacunas, cuya temperatura debe conservarse entre 2 °C y 8 °C de forma continua.

Actualmente, el monitoreo de temperatura en los establecimientos donde se almacenan estas vacunas se realiza de manera manual y mediante equipos de registro básicos. Este enfoque presenta limitaciones concretas: no permite la detección temprana de desvíos térmicos, dificulta el monitoreo simultáneo de múltiples heladeras y no genera los registros continuos necesarios para demostrar la trazabilidad de la cadena de frío. La ruptura de esta cadena compromete la integridad biológica de las vacunas, afectando el producto sin que el operador pueda detectarlo visualmente, causando un significativo impacto sanitario y económico.

Ante las limitaciones descritas, el presente trabajo plantea el diseño y fabricación de un prototipo de dispositivo IoT de bajo costo cuya función principal es el monitoreo en tiempo real de la temperatura en heladeras destinadas al almacenamiento de vacunas bovinas. El sistema asegura el registro y almacenamiento continuo de datos frente a interrupciones del suministro eléctrico, posibilita su transmisión remota y permite su visualización a través de una plataforma de monitoreo, garantizando la trazabilidad de la cadena de frío.

El presente trabajo representa una respuesta concreta ante una problemática real del sector agropecuario nacional, integrando herramientas y conocimientos propios de la ingeniería mecatrónica en el desarrollo de una solución de bajo costo y gran valor práctico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar el prototipo de un dispositivo IoT de bajo costo y fácil instalación para el monitoreo en tiempo real de la temperatura de heladeras de almacenamiento de vacunas contra la Aftosa y/o Brucelosis, capaz de registrar y almacenar datos de forma continua incluso ante cortes de energía, transmitirlos remotamente y visualizarlos para garantizar la trazabilidad de la cadena de frío.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte sobre sistemas de monitoreo y tecnologías IoT.
- Seleccionar los componentes adecuados para el desarrollo del dispositivo en función de los requisitos del sistema.
- Diseñar el hardware del dispositivo.
- Fabricar el prototipo del dispositivo.
- Desarrollar el firmware, que incluye la lógica de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos.
- Desarrollar una interfaz de monitoreo remoto que permita visualizar en tiempo real el estado de una o múltiples heladeras y generar reportes de trazabilidad.
- Validar el sistema en condiciones similares a las de uso real, verificando la confiabilidad en la transmisión y registro de datos.
- Realizar un análisis de los costos totales del proyecto, abarcando la fabricación del dispositivo y los servicios requeridos para su operación.

1.3 Alcances y limitaciones

El presente proyecto comprende el diseño y la fabricación del prototipo de un dispositivo IoT de bajo costo destinado al monitoreo de temperatura en heladeras utilizadas para el almacenamiento de vacunas contra la Aftosa y Brucelosis en ganado bovino. El desarrollo incluye el hardware del dispositivo, el firmware embebido y la plataforma de monitoreo remoto.

El dispositivo será capaz de medir y registrar datos de forma continua, transmitirlos en tiempo real mediante conexión Wi-Fi, operar de manera autónoma ante interrupciones del suministro eléctrico y generar registros que permitan la trazabilidad de la información. A su vez, la plataforma web permitirá el monitoreo y la visualización remota de los datos.

El proyecto no contempla la instalación del dispositivo en las locaciones de uso final, quedando esta etapa sujeta a una implementación posterior en conjunto con SENASA. Asimismo, no se incluye el control activo de la temperatura (actuación sobre los equipos de refrigeración), dado que estos sistemas ya disponen de mecanismos propios de regulación, ni el cumplimiento de certificaciones específicas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Fiebre aftosa

La Fiebre Aftosa es una enfermedad viral, de presentación aguda, altamente contagiosa y de rápida difusión. Es producida por un virus perteneciente a la familia Picornaviridae que afecta a los animales biungulados (pezuña hendida) domésticos y silvestres como bovinos, ovinos, caprinos y porcinos. [1]

Los signos clínicos característicos en bovinos son la aparición de ampollas (o vesículas) en la nariz, lengua, labios, cavidad oral, entre los dedos, encima de las pezuñas, ubres y puntos de presión en la piel. Las ampollas reventadas pueden ocasionar cojera extrema y desgana para moverse o inapetencia. Las ampollas abiertas también pueden dar lugar a infecciones bacterianas secundarias. Otros síntomas observados con frecuencia son fiebre, depresión, hipersalivación, pérdida de apetito y de peso, caída de la producción de leche. La salud de los terneros jóvenes puede verse comprometida por la falta de leche de las madres infectadas. En caso de infección con el virus de la fiebre aftosa, la muerte puede acaecer antes de que aparezcan las ampollas debido a los estragos que el virus causa en el músculo cardíaco. [2]

Una de las características principales del virus es su fácil propagación ya que se puede propagar tanto de forma directa como indirecta tal como se ilustra en la Figura 1.1.

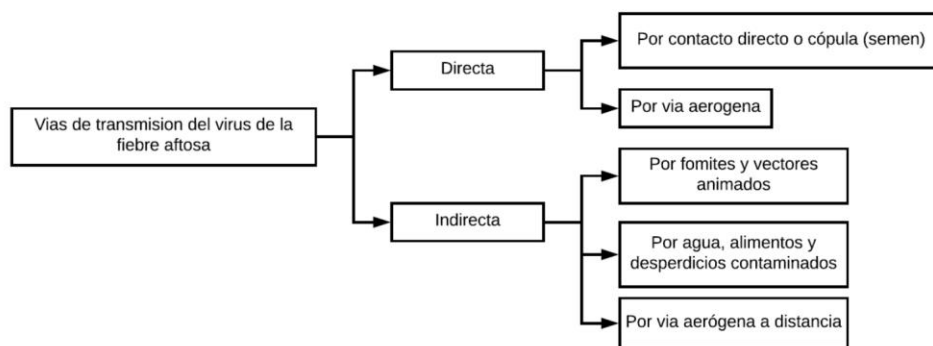


Figura 1.1 Vías de transmisión de aftosa, tomado de [1]

1.4.2 Brucelosis

La Brucelosis Bovina es una enfermedad infectocontagiosa de carácter crónico causada por la bacteria *Brucella abortus*, que afecta a una amplia variedad de especies animales, entre ellas bovinos, cerdos, cabras, ovejas, camélidos, bisontes, alces, ciervos, caballos y caninos, así como también al ser humano, razón por la cual se clasifica como una zoonosis. [3]

Los principales síntomas clínicos de la brucelosis son los abortos espontáneos de terneros, la retención de placenta, las lesiones articulares, nacimientos débiles y en algunos casos puede provocar incluso la esterilidad del ganado tal como se observa en la Figura 1.2.

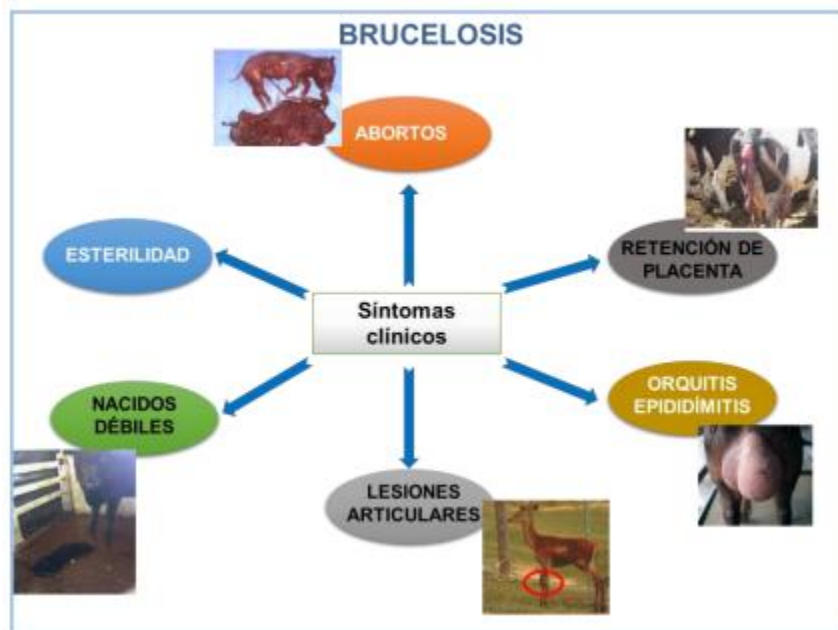


Figura 1.2 Síntomas clínicos de la brucelosis, tomado de [3]

1.4.3 Internet de las cosas IoT

El término “Internet de las Cosas”, se refiere al conjunto de dispositivos físicos que incorporan sensores, software y conectividad a internet permitiéndoles recopilar, procesar e intercambiar datos de forma automática, sin necesidad de intervención humana directa [4].

A diferencia de los sistemas informáticos tradicionales, donde normalmente se requiere la participación de un usuario, el IoT permite que distintos objetos del entorno físico como todo tipo de sensores, dispositivos electrónicos o actuadores funcionen como nodos inteligentes

dentro de una red conectada. Gracias a esta interconexión, es posible monitorear, gestionar y controlar procesos de manera eficiente en una gran variedad de aplicaciones.

1.4.4 Dispositivos IoT

Un dispositivo IoT es cualquier objeto físico capaz de recopilar datos de su entorno y conectarse a Internet para transmitir esa información a una red o a otro dispositivo de interés, sin necesidad de intervención humana directa. [5]

Para que esto sea posible, el dispositivo integra en un mismo sistema varios componentes que trabajan en conjunto: sensores, encargados de capturar información del entorno físico como temperatura, humedad, movimiento, etc y convertirla en señales eléctricas interpretables, un procesador o microcontrolador que actúa como el cerebro del dispositivo interpretando esos datos, ejecutando instrucciones y gestionando la comunicación con otros sistemas; y un módulo de conectividad, que permite al dispositivo transmitir los datos a través de redes como Wi-Fi, Bluetooth, 4G/5G u otras tecnologías. [6]

1.4.5 Protocolo de conexión

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas y estándares que define cómo deben enviarse, recibirse y procesarse los datos entre dos o más dispositivos dentro de una red. Sin estas reglas, los dispositivos no tendrían forma de entenderse entre sí, ya que cada uno podría estructurar la información de manera distinta. En ese sentido, los protocolos actúan como un lenguaje común que garantiza que la información llegue al destino correcto, en el formato correcto y sin errores, independientemente del fabricante o del tipo de hardware involucrado.

Desde el punto de vista técnico, un protocolo de comunicación define la sintaxis del mensaje (cómo está estructurado), la semántica (qué significa cada campo) y la sincronización (cuándo y en qué orden se transmiten los datos), incluyendo también los mecanismos de detección y recuperación de errores. [7]

1.4.6 Bases de datos

Una base de datos es un sistema organizado que permite almacenar, gestionar y recuperar grandes volúmenes de información de manera estructurada y eficiente. A diferencia de un simple archivo o planilla, una base de datos no solo guarda datos sino que también los

interrelaciona, permitiendo que distintos sistemas y usuarios accedan a ellos de forma simultánea, confiable y controlada. En el contexto de un sistema IoT, las bases de datos cumplen el rol de repositorio central donde se acumulan los datos enviados por los dispositivos de campo para su posterior análisis y visualización [7].

1.4.7 Cadena de frío

La cadena de frío es el conjunto de procedimientos, equipos y controles destinados a garantizar que un producto sensible a la temperatura se mantenga dentro del rango térmico requerido durante un determinado tiempo.

La ruptura de la cadena de frío, es decir, la exposición a temperaturas fuera del rango admisible degrada la integridad del producto. Esto significa que el producto pierde total o parcialmente su capacidad de generar la respuesta deseada.

1.4.8 Estatus sanitario libre de enfermedad

La fiebre aftosa es una enfermedad sobre la cual la OMSA (Organización Mundial de Sanidad Animal) ha establecido una lista oficial de países y zonas indemnes. La OMSA ha definido un procedimiento con fundamento científico e imparcial para el reconocimiento del estatus sanitario respecto a la fiebre aftosa de los Países y Territorios Miembros en su integridad o en zonas definidas.

Dicho estatus sanitario comprende las siguientes categorías:

- Libre de fiebre aftosa sin vacunación (país o zona).
- Libre de fiebre aftosa con vacunación (país o zona).
- Suspensión del estatus libre de fiebre aftosa.
- Países y zonas sin estatus oficial para la fiebre aftosa.

Mapa del estatus oficial de fiebre aftosa de los Miembros de la OMSA

Última actualización abril de 2026

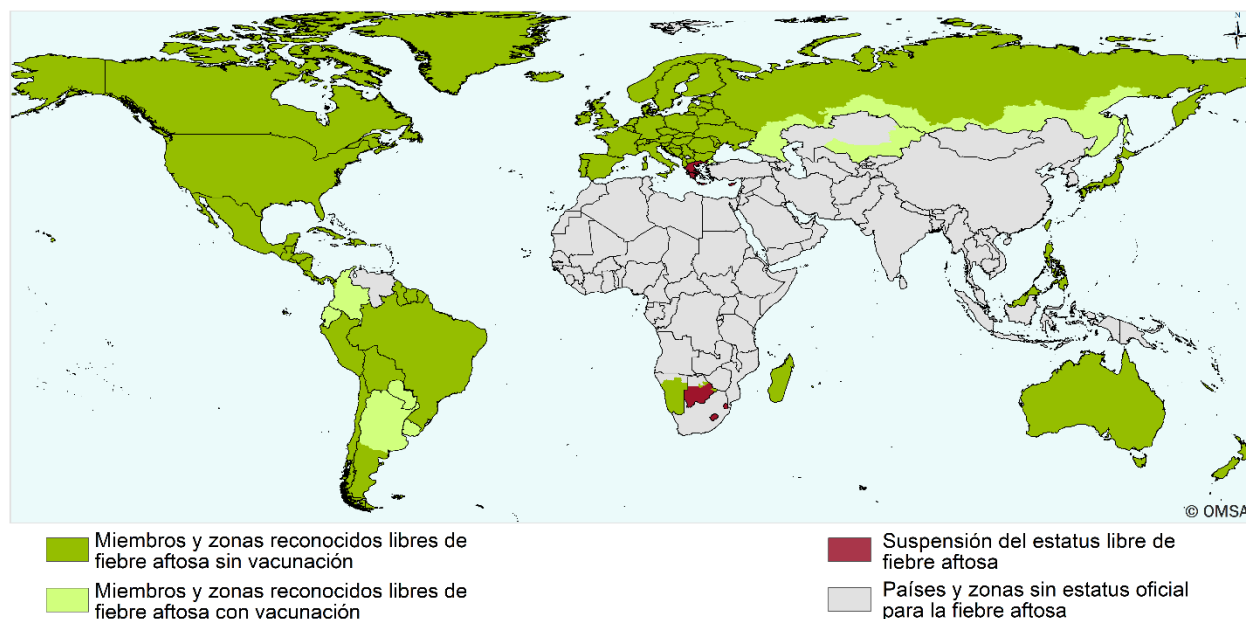


Figura 1.3 Mapa de estatus oficial aftosa, tomado de [9]

1.5 Análisis del estado del arte

1.5.1 Estatus sanitario de Argentina, aftosa

El territorio de la República Argentina se encuentra íntegramente cubierto por cuatro zonas reconocidas oficialmente como libres de fiebre aftosa por la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). De estas, tres corresponden a zonas libres sin vacunación: la región patagónica, la zona de pastoreo de verano en la provincia de San Juan y la Patagonia Norte. La cuarta zona, conformada por las regiones Centro Norte y el Cordón Fronterizo, posee el estatus de zona libre con vacunación, siendo esta la región de mayor densidad de rodeo bovino del país y donde se ejecutan las campañas sistemáticas de inmunización antiaftosa bajo la autoridad del SENASA. Esta zonificación, reconocida mediante resolución de la Asamblea Mundial de la OMSA, refleja el sostenido esfuerzo sanitario desarrollado por Argentina en las últimas décadas para alcanzar y mantener su condición de país libre de la enfermedad. [9]

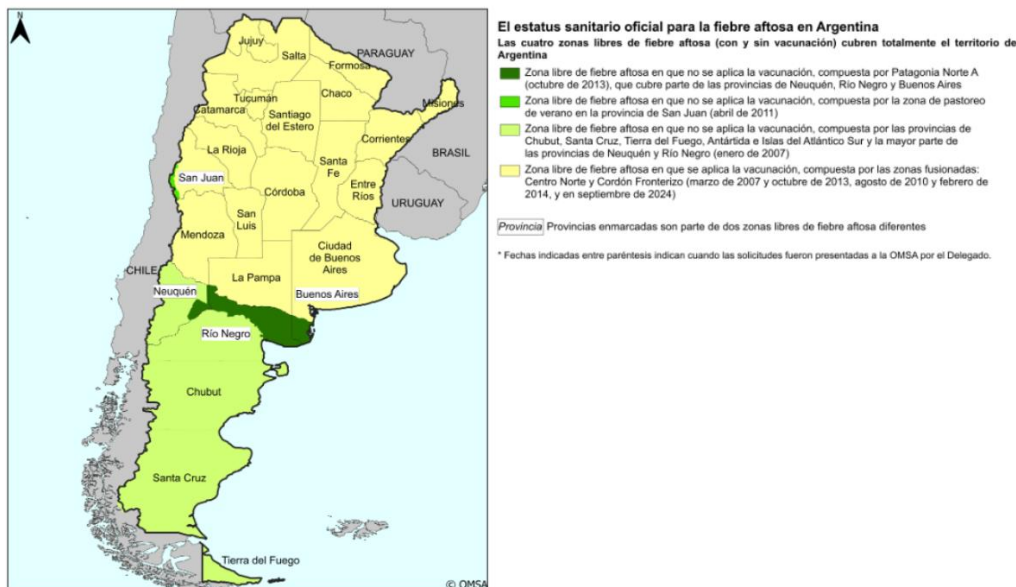


Figura 1.4 Zonas libres de aftosa en Argentina, tomado de [9]

1.5.2 Refrigeradores utilizados para almacenamiento de vacunas bovinas

En la actualidad, las vacunas bovinas son almacenadas en su mayoría en tres tipos diferentes de refrigeradores comerciales los cuales se ilustran en la Figura 1.5. El primero corresponde a las heladeras vitrinas, equipos de apertura frontal con puerta de vidrio, generalmente provistos por los laboratorios que comercializan las vacunas. El segundo tipo son las heladeras de tapa superior o de cofre muy similares a los freezers de uso doméstico, cuya apertura se realiza por la parte superior del equipo. Por último, se encuentran las heladeras convencionales de uso domiciliario, ampliamente utilizadas debido a su disponibilidad y bajo costo. Los tres tipos de equipos son utilizados indistintamente en los establecimientos destinados al almacenamiento de vacunas, dependiendo de la disponibilidad y los recursos de cada locación. Estos refrigeradores tienen asociado el correspondiente control de temperatura on/off.



Figura 1.5 Refrigeradores utilizados, fuente propia.

1.5.3 Sistema de trazabilidad actual

El sistema de trazabilidad actual es enteramente manual y de escasa complejidad tecnológica. Cada refrigerador cuenta con un termómetro asociado, el cual al igual que los equipos de almacenamiento, puede ser de distintos tipos tal como se aprecian en la Figura 1.6. Sin embargo, en la práctica los más utilizados son el termómetro digital con sonda y el termómetro analógico de alcohol, ambos colocados directamente en el interior del refrigerador.



Figura 1.6 termómetros utilizados, fuente propia.

El registro de las mediciones se realiza mediante una planilla de papel completada manualmente por el establecimiento responsable. Dicha planilla contiene campos básicos tales como el nombre del ente sanitario y el establecimiento correspondiente, el mes y año de referencia, la fecha y hora de cada medición y el nombre del responsable de la toma. Cada planilla cubre un período mensual; al finalizar el mes, es reemplazada por una nueva correspondiente al período siguiente. Un ejemplo de esta planilla puede observarse en la Figura 1.7.

FECHA	HORA	TEMPERATURA	RESPONSABLE TOMA	DADOS EN STOCK	CONTROL OFICIAL
01	08:30	7,1°C	Flaco		
02	08:30	6,3°C	Flaco		
03	09:30	7,3°C	Flaco		
04	09:30	7,8°C	Flaco		
05	08:00	7,8°C	Flaco		
06	08:00	6,3°C	Flaco		
07	08:30	6,2°C	Flaco		
08	08:00	7,1°C	Flaco		
09	08:00	6,3°C	Flaco		
10	08:00	6,3°C	Flaco		
11	08:30	7,3°C	Flaco		
12	08:30	7,6°C	Flaco		
13	08:30	6,6°C	Flaco		
14	08:30	6,6°C	Flaco		
15	08:30	6,6°C	Flaco		
16	08:30	6,6°C	Flaco		
17	08:30	6,6°C	Flaco		
18	08:30	6,6°C	Flaco		
19	08:30	6,6°C	Flaco		
20	08:30	6,6°C	Flaco		
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

Figura 1.7 Tabla de trazabilidad actual, fuente propia

1.5.4 Precedentes

En el marco de trabajos previos, SENASA llevó a cabo el desarrollo de un modelo básico concebido como producto mínimo viable (PMV), con el propósito de evaluar y testear el comportamiento y funcionamiento de este tipo de dispositivos en aplicaciones orientadas a la medición de temperatura. Esta iniciativa permitió sentar las bases técnicas necesarias para identificar las capacidades, limitaciones y requerimientos del sistema final.

CAPÍTULO 2: Análisis y Desarrollo

La etapa de diseño inició con la definición de la arquitectura general del sistema, a partir de la cual se identificaron y determinaron los componentes que conforman el sistema IoT planteado.

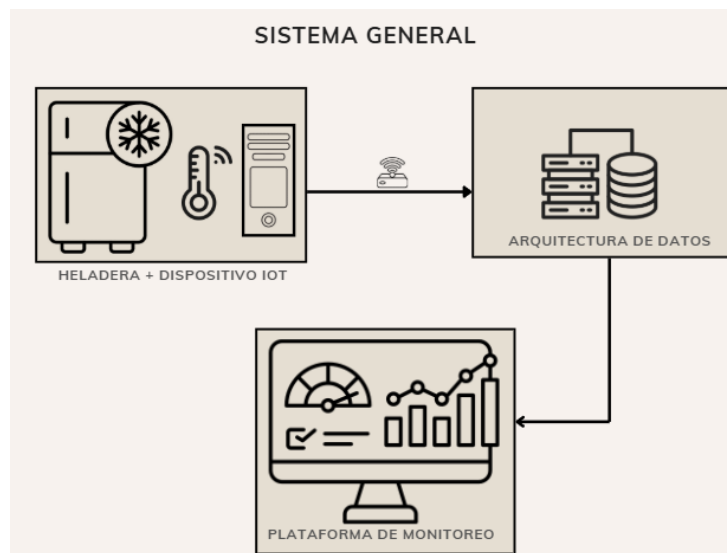


Figura 2.1 Arquitectura general propuesta para el sistema IoT

Como resultado de este análisis, el sistema se delimitó en tres componentes fundamentales, los cuales se presentan en la Figura 2.1.

2.1 Diseño del dispositivo IoT

El diseño del dispositivo comenzó teniendo en cuenta los requisitos fundamentales planteados, entre los cuales se destacan: mantener un costo total inferior a los 60 dólares estadounidenses, utilizar componentes comerciales y lograr un diseño lo más compacto posible. Se tuvieron estos requisitos en cuenta a lo largo de cada una de las etapas de diseño y fabricación.

2.1.1 Selección de componentes principales

2.1.1.1 Microcontrolador

Con el objetivo de definir el microcontrolador que más se adapte al proyecto se procedió a realizar una tabla de factores ponderados, seleccionando las características fundamentales que debe cumplir.

Tabla 2.1 Factores ponderados - Microcontrolador

Factor de evaluación	Ponderación	ESP 32 S3 N16R18	ESP 32-C3 Super Mini	Arduino Nano 33-IoT	Raspberry Pi Zero 2W	STM 32
Escala de puntuación: 1 = Muy bajo - 2 = Bajo - 3 = medio - 4 = alto - 5 = excelente Puntaje ponderado = puntuación × ponderación						
Wi-Fi + Bluetooth integrado	10	5	5	5	5	1
Capacidad de memoria flash	8	5	4	4	5	4
Capacidad de procesamiento	8	5	4	4	4	4
Bajo consumo	8	3	5	4	4	4
Bajo costo	10	3	5	3	3	4
Puntaje ponderado total		184	196	156	178	146

El ESP32-C3 Super Mini (Figura 2.2) obtuvo el mayor puntaje: total 196, destacándose por su conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrados, el menor costo del grupo (4 USD) aproximadamente un tamaño compacto (22 × 18 mm) y un bajo consumo en modo activo.



Figura 2.2 ESP 32-C3 Super Mini

Este microcontrolador dispone de 4 MB de memoria Flash, distribuidos entre el bootloader, la tabla de particiones, el firmware de la aplicación y la partición de datos de usuario.

Considerando el tamaño del firmware compilado con todas sus dependencias, se adopta un valor conservador de 2 MB disponibles para almacenamiento de datos.

Cada registro almacenado por el sistema contiene: El nombre del dispositivo en este caso “Heladera1”, la temperatura con un decimal y timestamp Unix, en el formato:

Heladera1,23.4,1715612325

Ocupando 25 bytes por registro. La capacidad total resulta:

Aplicando un margen de seguridad del 20% para evitar corrupción por escritura en memoria llena, la capacidad de almacenamiento efectiva se estimó mediante la expresión (1):

$$N = \frac{1.600.000 \text{ bytes}}{25 \text{ bytes/registro}} = 64.000 \text{ registros} \quad (1)$$

Con el objetivo de estimar la cantidad de días que el dispositivo puede almacenar datos se elaboró la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Tiempo de autonomía offline

Frecuencia de muestro	Tiempo de autonomía offline
Cada 1 minuto	44 días
Cada 5 minutos	222 días
Cada 15 minutos	666 días

La capacidad supera ampliamente la autonomía offline necesaria y se comprobó que la limitante o mayormente conocida como cuello de botella es la autonomía ante cortes de electricidad que otorga la batería de respaldo.

2.1.1.2 Sonda de temperatura

La sonda que se seleccionó es la DS18B20 es una sonda digital de temperatura que opera mediante el protocolo 1-Wire, requiriendo un único pin de datos para comunicarse con el microcontrolador. Su rango de medición abarca desde -55°C hasta +125°C, con una precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Se alimenta con una tensión de entre 3,0 V y 5,5 V, lo que lo hace directamente compatible con el ESP32-C3 Super Mini sin necesidad de circuitos adicionales de adaptación. Su encapsulado en sonda de acero inoxidable sellada lo hace completamente sumergible y resistente a la humedad, permitiendo operar en ambientes adversos de forma continua. A esto se suma su bajo costo y amplia disponibilidad en el mercado.



Figura 2.3 Sonda DS18B20

2.1.1.3 Módulo de carga UPS

Para la gestión de energía se escogió el módulo 1BUPS-5V1A, un desarrollo nacional de LAB1 Technologies, que constituye una solución UPS compacta que acepta alimentación de 5V, entrega una salida regulada de 5V a 1A mediante un circuito boost integrado y gestiona de forma automática la batería 18650 con protección contra sobrecarga y descarga excesiva. Su característica más crítica para este proyecto es la conmutación instantánea y sin interrupciones entre la red eléctrica y la batería de respaldo ante un corte de energía, garantizando que el ESP32-C3 continúe operando sin reiniciarse ni perder datos. Al restaurarse la alimentación externa, el módulo retoma la carga desde la red y recarga la batería simultáneamente, todo en un módulo de compacto de 1,6 x 3,3 cm.

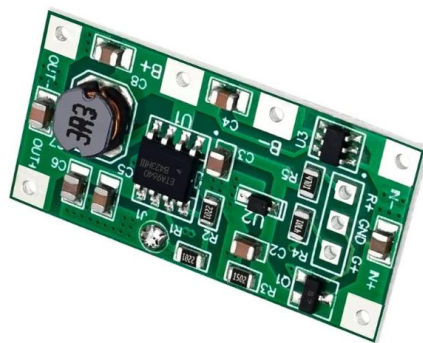


Figura 2.4 Módulo de carga UPS

2.1.1.4 Display OLED

El display que se escogió es el OLED 1.3" SH1106 128x64 I2C, una pantalla monocromática de tecnología OLED con resolución de 128x64 píxeles, controlador SH1106, interfaz de comunicación I2C que requiere únicamente dos pines del microcontrolador, y alimentación compatible con 3,3V y 5V. Opera en un rango de temperatura de -30°C a +70°C, tiene un ángulo de visión mayor a 160.



Figura 2.5 Display OLED SH1106

2.1.1.5 Batería

La batería que se seleccionó es una celda de litio formato 18650 de 2600 mAh, ampliamente utilizada en proyectos de electrónica embebida por su equilibrio entre capacidad energética, costo y disponibilidad en el mercado. Opera con una tensión nominal de 3,7 V y una tensión de carga máxima de 4,2 V, siendo gestionada por el módulo UPS que incorpora circuito de protección y un convertidor step-up que entrega una salida estable de 5 V al sistema. Considerando un consumo promedio del sistema de aproximadamente 160 mA, que contempla el ESP32-C3 en modo activo con Wi-Fi, la sonda DS18B20, el display OLED y un LED encendido en forma continua, y aplicando un factor de eficiencia del 80% sobre la capacidad nominal de la batería para contemplar las pérdidas del convertidor (2), la autonomía estimada del sistema es (3):

$$\text{Capacidad real} = 2600 \text{ mAh} \times 0,80 = 2080 \text{ mAh} \quad (2)$$

$$\text{Autonomía} = \frac{2080 \text{ mAh}}{160 \text{ mA}} = 13 \text{ horas} \quad (3)$$

Esta autonomía de 13 horas garantiza la continuidad del monitoreo y el almacenamiento local de datos ante cortes de energía eléctrica de duración normal, cubriendo ampliamente los escenarios de interrupción más frecuentes.

2.1.2 Diseño de placa PCB

El diseño de la placa de circuito impreso comenzó con una etapa de prueba en protoboard, en la cual se buscó validar de forma preliminar el correcto funcionamiento e interacción de los componentes del dispositivo IoT.

En esta etapa se procedió a conectar y verificar el funcionamiento de la sonda de temperatura, el ESP32-C3 Super Mini, la pantalla OLED, el módulo UPS, los LEDs, los pulsadores y demás elementos principales del dispositivo tal como se observa en la Figura 2.6. De forma complementaria, se ejecutó el firmware correspondiente para la validación preliminar del sistema.

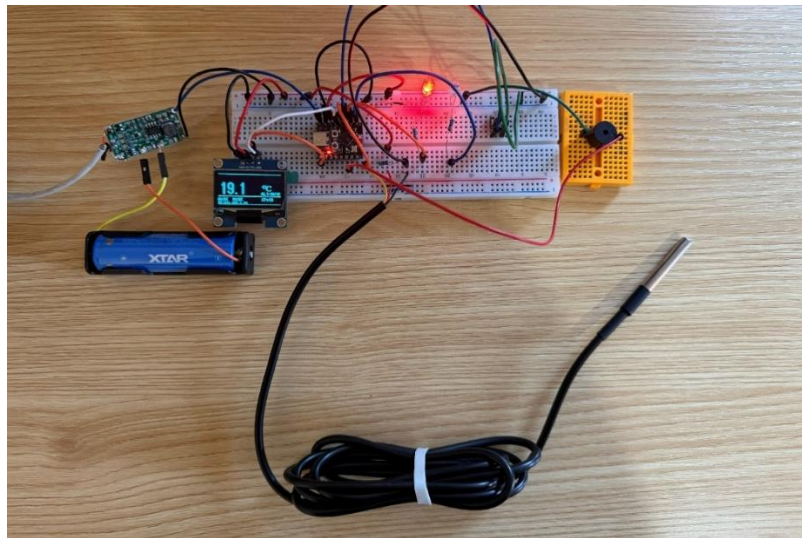


Figura 2.6 Pruebas en protoboard

Los resultados de esta etapa fueron satisfactorios: se logró validar el correcto funcionamiento del montaje realizado en protoboard, por lo que se procedió a la etapa de diseño de la placa PCB.

El software que se utilizó para esta tarea fue EasyEDA, una herramienta de acceso gratuito que cuenta con una amplia biblioteca de componentes y repositorios, lo que permite realizar diseños de nivel profesional. La plataforma ofrece integración directa con el servicio de

fabricación JLCPCB (China), desde donde es posible solicitar la manufactura de la placa, o bien exportar los archivos de producción para fabricarla mediante el método que se prefiera. En la Figura 2.7 se encuentran detalladas las conexiones entre los componentes principales del dispositivo haciendo uso de las etiquetas correspondientes.

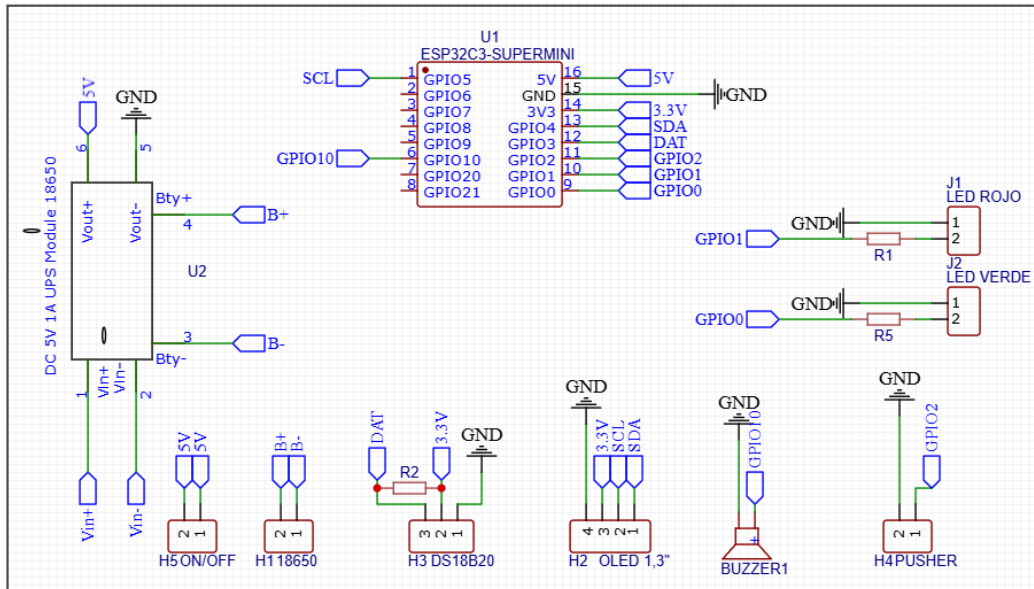


Figura 2.7 Esquema de conexiones en EasyEDA

Una vez completo el esquemático, se procedió a la etapa de ruteo de la placa PCB. En esta instancia se definió el tamaño de la placa y la disposición física de los componentes sobre la misma, también se trazaron las pistas de cobre que materializan las conexiones eléctricas establecidas en el esquemático. Durante este proceso se consideraron criterios de diseño tales como la separación entre pistas, el ancho de estas en función de los requerimientos del proceso de fabricación y la minimización de cruces. El resultado fue un diseño compacto que satisface los requerimientos eléctricos y mecánicos de sujeción de los componentes del dispositivo como se observa en la Figura 2.8.

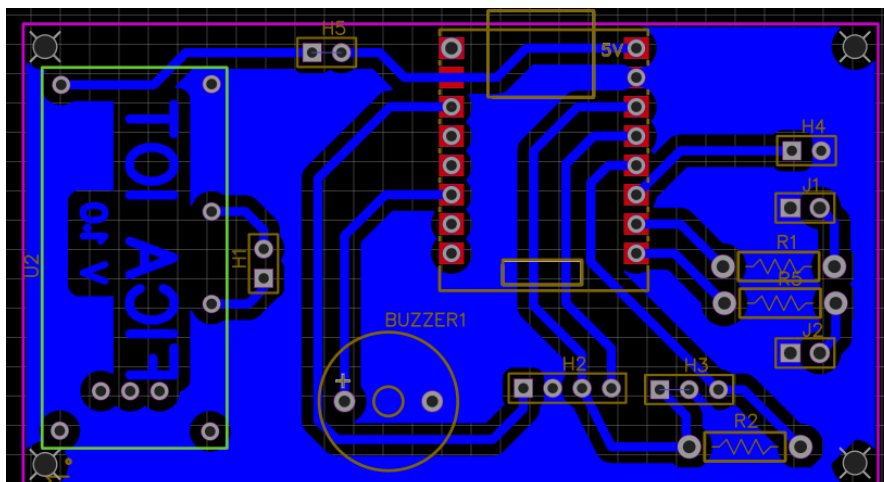


Figura 2.8 Layout de la placa PCB

Es importante señalar que la tecnología de montaje que se seleccionó es THT (Through-Hole Technology), es decir de componentes de orificio pasante, en la cual los terminales de los componentes atraviesan la placa y se sueldan en la cara opuesta, lo cual garantizó una fijación mecánica robusta y acorde a los componentes seleccionados.

2.1.3 Diseño del gabinete

El diseño del gabinete o case constituyó una de las etapas fundamentales del proyecto, ya que tiene como objetivo alojar de forma compacta y segura todos los componentes electrónicos, garantizando las condiciones mínimas para un funcionamiento correcto del dispositivo. Para llevar a cabo esta tarea se utilizó Fusion 360, una herramienta de diseño CAD ampliamente utilizada tanto en el ámbito industrial como en el educativo y es muy importante mencionar que ofrece licencia gratuita para estudiantes.

El diseño se pensó íntegramente para su materialización mediante impresión 3D. Esta decisión implicó considerar desde la etapa de diseño las restricciones propias de dicha tecnología de fabricación, tales como ángulos, tolerancias y orientación de la impresión, con el fin de garantizar la correcta fabricación de las piezas.

Con el objetivo de lograr un diseño lo más compacto posible se optó en primera instancia por realizar una etapa de “prediseño” en la cual se tomaron las medidas de todos los componentes mediante calibre vernier y se elaboró un bosquejo a mano alzada que sirvió como primer acercamiento a la geometría y distribución espacial de los elementos dentro del gabinete.

A partir de dicho bosquejo se definieron las dos partes que conforman el gabinete: el cuerpo principal, encargado de alojar la batería, la placa PCB, el interruptor y los pulsadores; y la tapa, sobre la cual se montan la pantalla OLED y los indicadores LED. El conjunto resultante presenta dimensiones totales de 81 mm × 44 mm × 44 mm.

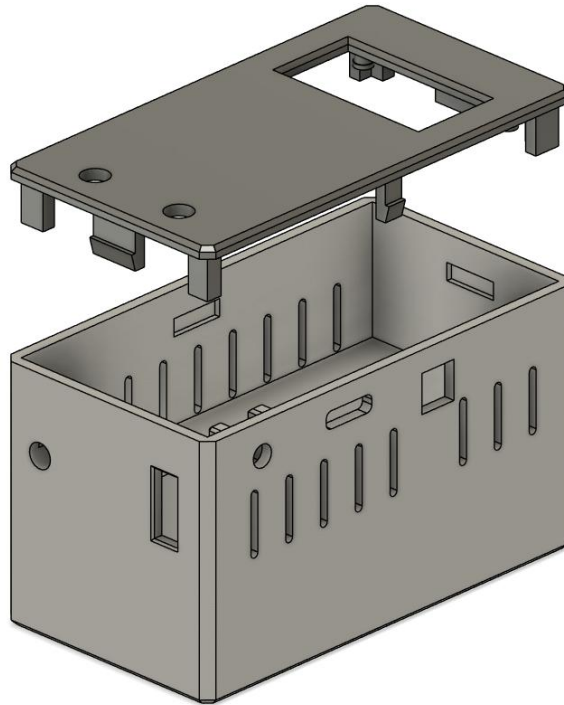


Figura 2.9 Diseño 3D carcasa + tapa

El diseño logró integrar todos los componentes del dispositivo en un gabinete de dos piezas de geometría simple tal como se observa en la Figura 2.9, compacta y fácil de materializar con impresión 3D.

Desde el punto de vista del ensamble, se optó por un sistema de unión mediante encastrés entre la tapa y el cuerpo principal, prescindiendo del uso de tornillos, lo cual simplifica tanto el proceso de montaje como el de mantenimiento, tal como se ilustra en la Figura 2.10.

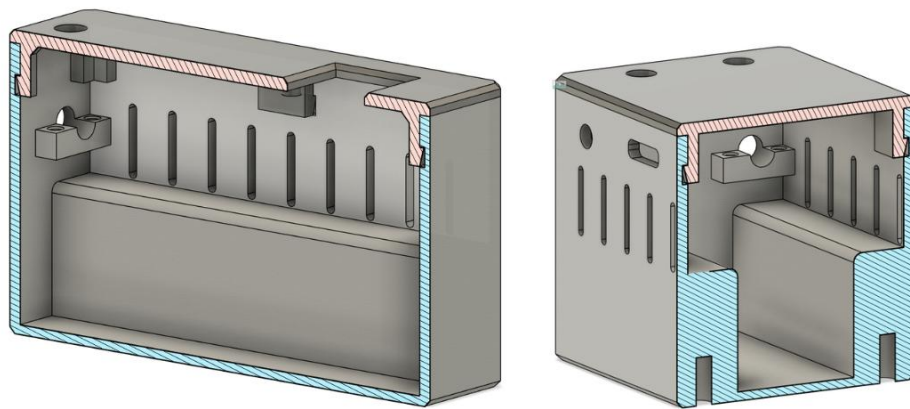


Figura 2.10 Análisis de secciones - Encastrés

Por otro lado, la parte posterior del gabinete incorporó fijación magnética al entorno: cavidades para imanes de neodimio, que permiten adherir el dispositivo magnéticamente a superficies metálicas como las paredes de una heladera.

Por último, se realizó un ensamble virtual de todas las piezas que conforman el dispositivo tal como se representa en la Figura 2.11 con el objetivo de obtener un primer acercamiento a la apariencia y configuración final del mismo. Esta instancia permitió verificar la correcta interacción geométrica entre el cuerpo principal y la tapa, validar que los componentes electrónicos quedaran correctamente posicionados dentro del gabinete y confirmar que los accesos a los elementos de interfaz tales como pulsadores, interruptores, pantalla OLED e indicadores LED resultaran accesibles y funcionales. Asimismo, se evaluó de forma preliminar la estética general del dispositivo.

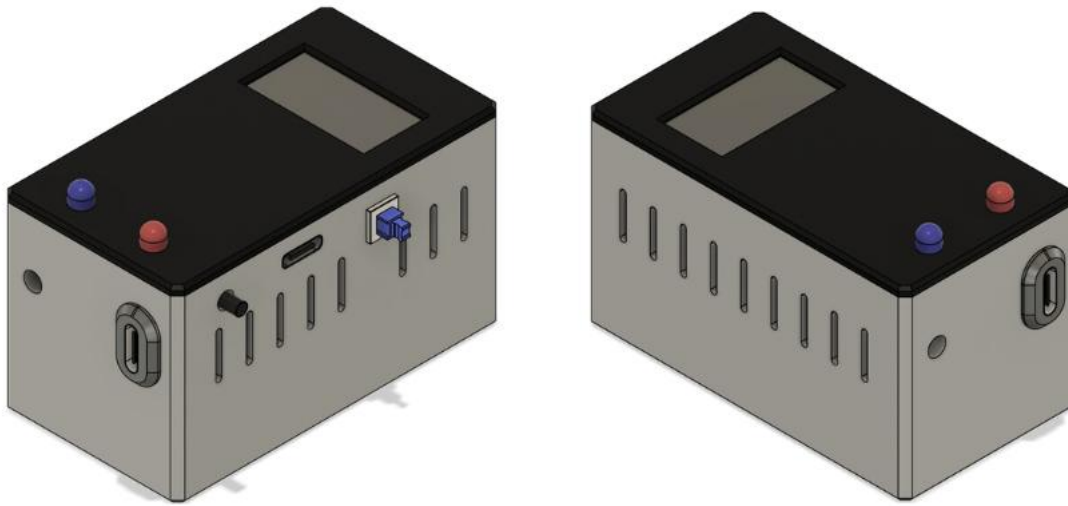


Figura 2.11 Diseño 3D del ensamble final

2.2 Diseño de la arquitectura de datos

El diseño de la arquitectura de datos constituyó una de las partes fundamentales para el correcto funcionamiento del prototipo y al mismo tiempo representó un aspecto clave en la proyección del dispositivo hacia una futura implementación a mayor escala. Al igual que en otras etapas del diseño, esta arquitectura se definió en su totalidad conforme a los requerimientos solicitados, los cuales establecieron dos condiciones principales: que todo el sistema pueda ejecutarse de forma local y que la arquitectura sea fácilmente escalable hacia un VPS o servidor privado para su futura implementación.

Como resultado, se definió la siguiente arquitectura del sistema:

- Capa de adquisición: ESP32-C3 Super Mini (Dispositivo IoT).
- Capa de comunicación: Protocolo MQTT con broker Mosquitto.
- Capa de procesamiento: Node-RED para transformación y escritura de datos.
- Capa de almacenamiento: InfluxDB como base de datos.
- Capa de visualización: Grafana para monitoreo y trazabilidad

- Infraestructura y despliegue: Docker como plataforma de encapsulamiento del entorno.

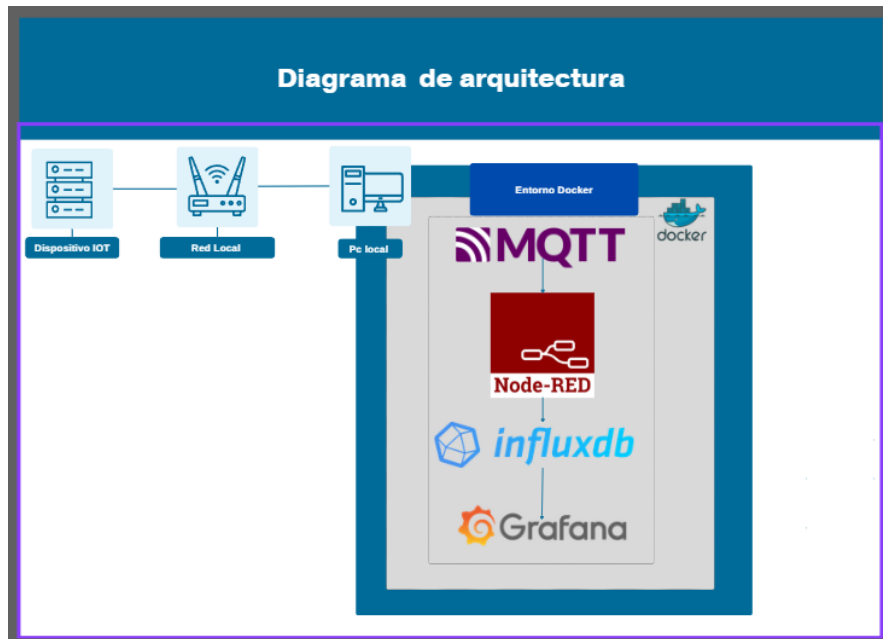


Figura 2.12 Diagrama de arquitectura

En la Figura 2.12 se observa el esquema que ilustra la interacción entre los componentes que conforman esta etapa del diseño. En él se puede observar que la arquitectura se pensó para ejecutarse de forma local; sin embargo, incorpora una característica de particular relevancia: todo el entorno se encuentra desplegado sobre Docker.

Docker es una plataforma de código abierto que permite crear, desplegar y ejecutar aplicaciones dentro de contenedores. A diferencia de una máquina virtual tradicional, los contenedores comparten el núcleo del sistema operativo del host, lo que los hace significativamente más eficientes en términos de recursos y tiempos de arranque. En el contexto de este proyecto, el uso de Docker aportó dos ventajas concretas: por un lado, simplificó la reproducibilidad del entorno de desarrollo y producción; por otro, facilitó considerablemente una eventual migración del sistema hacia un VPS o servidor privado, ya que basta con trasladar los contenedores configurados sin necesidad de reinstalar ni reconfigurar cada servicio de forma independiente lo cual genera un gran ahorro de tiempo al momento de migrar el sistema.

2.2.1 Protocolo de transmisión de datos

El protocolo que se seleccionó para la transmisión de datos entre el dispositivo de adquisición y el resto del sistema es MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). MQTT es un protocolo de mensajería ligero basado en el modelo publicador-suscriptor, diseñado específicamente para entornos con recursos limitados y redes de baja disponibilidad de ancho de banda.

En este modelo, el ESP32-C3 actúa como publicador, enviando los datos de temperatura hacia un broker central, rol que en este sistema es desempeñado por Mosquitto. Mosquitto es un broker de código abierto que implementa el estándar MQTT y se encarga de recibir, gestionar y distribuir los mensajes hacia los suscriptores correspondientes. Su bajo consumo de recursos lo convierte en una opción ampliamente adoptada en proyectos IoT. La elección de MQTT por sobre otros protocolos respondió directamente a los requerimientos del sistema: menor carga en la transmisión, comunicación en tiempo real y compatibilidad nativa con el ecosistema de herramientas seleccionadas.

2.2.2 Node-RED

En el presente proyecto, Node-RED cumplió el rol de capa de procesamiento: recibe los mensajes publicados por el ESP a través del broker Mosquitto, aplica las transformaciones necesarias sobre los datos y los escribe en la base de datos InfluxDB. Esta cadena de procesamiento se configura íntegramente mediante flujos visuales, lo que reduce considerablemente la complejidad de implementación y facilita futuras modificaciones sin necesidad de escribir código, tal como se observa en la Figura 2.13. La correcta configuración de Node-RED constituyó una de las partes fundamentales del proyecto.

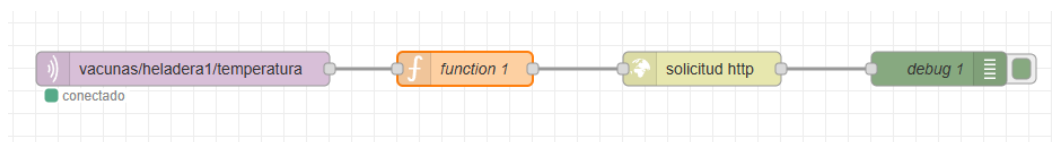


Figura 2.13 configuración de bloques en Node-RED

El flujo que se implementó se compone de cuatro nodos encadenados en secuencia. En primer lugar, un nodo suscriptor escucha el tópico MQTT vacunas/heladera1/temperatura, capturando los datos publicados por el ESP32-C3 cada vez que este realiza una medición. Luego,

el nodo function 1 aplica la lógica de transformación necesaria sobre el mensaje recibido, preparando el dato para su posterior envío. Luego, el nodo solicitud http se encarga de escribir ese dato procesado en InfluxDB mediante una solicitud HTTP; por último, el nodo de debug permitió verificar en tiempo real el correcto funcionamiento del flujo durante las etapas de prueba y validación del sistema.

2.2.3 Base de datos

Para el almacenamiento de los datos relevados por el sistema se seleccionó InfluxDB, una base de datos de series temporales de código abierto. A diferencia de las bases de datos tradicionales, InfluxDB está optimizada para el almacenamiento y consulta eficiente de datos indexados en el tiempo, lo que la convierte en una solución especialmente adecuada para aplicaciones de monitoreo.

Cada registro almacenado contiene, además del valor de temperatura y la unidad de la que proviene una marca temporal (*timestamp Unix*) generada automáticamente, lo que permite realizar consultas históricas y establecer alertas basadas en rangos de tiempo definidos. Esta característica resulta de particular relevancia para realizar la trazabilidad planteada.

Al igual que el resto de los servicios del sistema, InfluxDB se ejecutó dentro de un contenedor Docker, lo que garantizó su portabilidad y facilitó su eventual migración hacia un entorno de servidor privado o VPS.

2.2.4 Grafana

En este sistema, Grafana cumplió el rol de capa de visualización: se conecta directamente a InfluxDB y permite representar en tiempo real los datos de temperatura adquiridos por el dispositivo. A través de su interfaz web, se visualiza el historial de mediciones, se configuran los umbrales de alerta y se analiza el comportamiento térmico del entorno monitoreado a lo largo del tiempo. La selección de Grafana como interfaz de visualización se justificó en tres aspectos fundamentales: la facilidad de uso y acceso para el operador del sistema de monitoreo, su integración nativa con InfluxDB como base de datos y la recomendación por parte de SENASA, que ya utiliza Grafana en otros de sus proyectos, lo que la convierte en una interfaz familiar y de fácil adopción para su personal.

2.3 Plataforma de monitoreo en Grafana

Esta etapa de diseño fue una de las más importantes del proceso, ya que constituyó el panel de visualización principal que permite al usuario realizar el control y seguimiento e interactuar directamente con los equipos.

La interfaz de monitoreo se dividió en una sección de inicio y 3 secciones principales, cada una diseñada para una función específica. Se utilizaron los correspondientes colores en cada sección que responden a la normativa ANSI/ISA-101.01-2015 y se intentó mantener una estética sobria y sencilla que no generara confusión en el usuario.

2.3.1 Sección Inicio

La primera ventana que el usuario encuentra al ingresar es la sección de inicio, la cual funciona como pantalla de bienvenida al sistema. En ella se presentaron los logos institucionales y el botón para acceder al sistema de monitoreo, tal como se observa en la Figura 2.14.



Figura 2.14 Ventana de inicio – Plataforma de monitoreo

2.3.2 Sección 1: Vista Global

Al ingresar al sistema de monitoreo el usuario accede a un panel dividido en 3 secciones, la primera de ellas es la vista global. Tal como su nombre lo indica, esta vista tiene como objetivo

brindar un resumen rápido y centralizado del estado de todas las heladeras registradas en el sistema, permitiendo identificar de forma inmediata cualquier anomalía en las condiciones de almacenamiento sin necesidad de navegar por cada equipo de forma individual.

En ella se configuró la temperatura actual de cada unidad, clasificada mediante un código de tres colores que facilita la interpretación del estado operativo de los equipos:

- Verde: temperatura dentro del rango establecido; la unidad opera en condiciones normales.
- Amarillo: temperatura a un grado de los límites establecidos; indica una situación crítica que requiere atención.
- Rojo: temperatura fuera del rango establecido; indica una condición de riesgo que demanda intervención inmediata.

Este esquema de codificación cromática, coherente con la normativa ANSI/ISA-101.01-2015 adoptada en el diseño de la interfaz, permite al operador priorizar acciones correctivas de manera eficiente y reducir el tiempo de respuesta ante desvíos en la cadena de frío, tal como se observa en la Figura 2.15. Es importante aclarar que solo la primera heladera se conectó a datos reales provenientes del prototipo, las demás se encuentran “forzadas” a modo de ejemplificar el sistema con múltiples dispositivos.

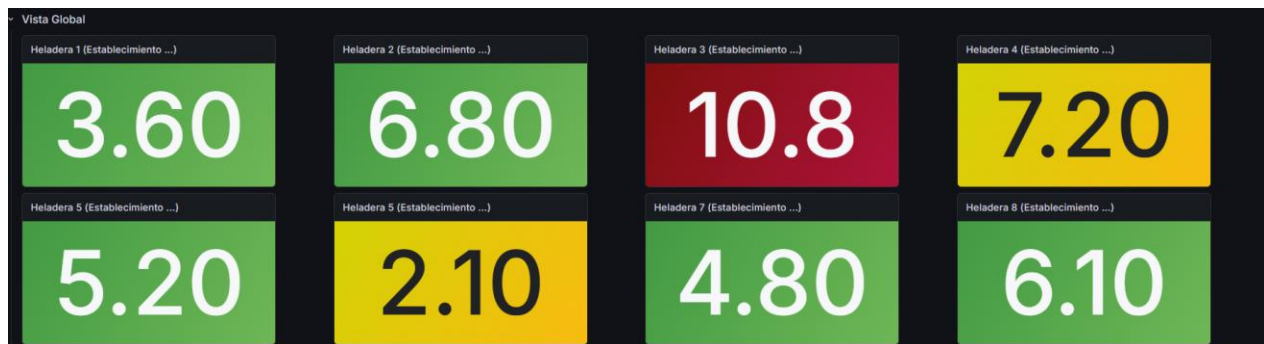


Figura 2.15 Vista global – Plataforma de monitoreo

2.3.3 Sección 2: Vista General

La vista general se diseñó con el objetivo de brindar información detallada sobre el estado individual de cada heladera registrada en el sistema, complementando así la visión global ofrecida por la sección anterior.

En la parte superior se encuentra el panel de estado actual que contiene la temperatura en tiempo real, el estado operativo del equipo (OK o Alerta), la marca temporal de la última lectura del sensor y la cantidad de heladeras activas en el sistema.

En la parte inferior se ubicó la sección de monitoreo, compuesta por un gráfico de control histórico de temperatura. En él se delimitaron dos líneas de referencia de color rojo en los valores de 2 °C y 8 °C, correspondientes a los límites del rango de almacenamiento establecido, mientras que el historial de temperatura se representó en color verde. Esta visualización permitió identificar de forma rápida desvíos en la cadena de frío y analizar el comportamiento térmico durante un período determinado.

A la derecha se posicionó un historial de registros en formato de tabla, que incluye los valores de temperatura censados, el horario de cada lectura y el estado operativo del equipo, el cual se actualiza automáticamente entre «OK» (verde) y «Alerta» (rojo) según las condiciones registradas tal como se observa en la Figura 2.16. Cabe destacar que esta vista está asociada a dos filtros ubicados en la parte superior del panel, mediante los cuales el operador puede seleccionar la heladera de interés y el rango horario deseado para el análisis.

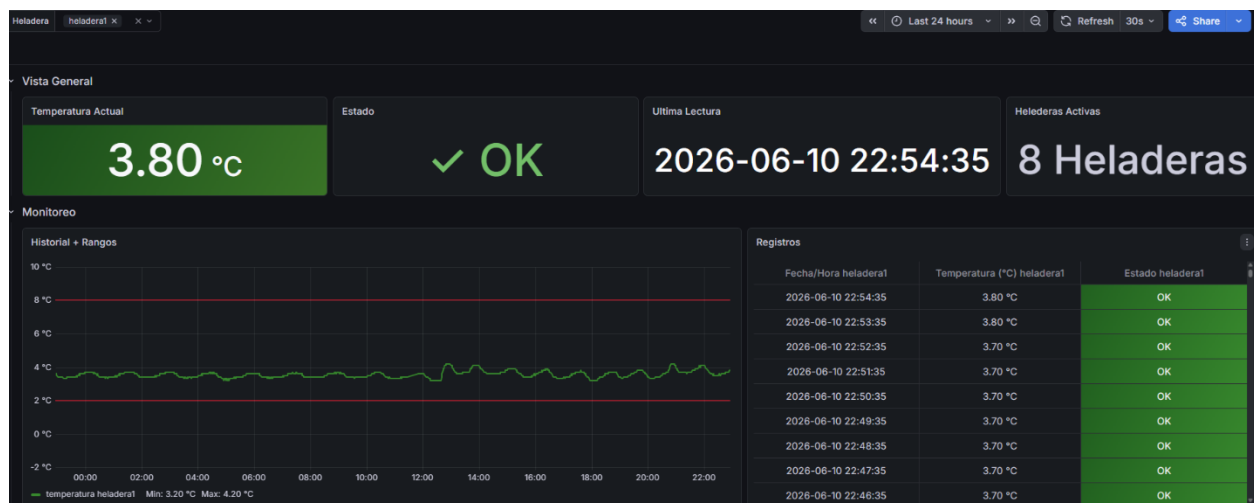


Figura 2.16 Vista general – Plataforma de monitoreo

2.3.4 Sección 3: Reportes

La sección de reportes se diseñó para ser sencilla e intuitiva tal como se observa en la Figura 2.17. A través de ella, el operador puede descargar los reportes de trazabilidad en formato PDF que el sistema genera de forma automática, los cuales constituyen un registro formal del

comportamiento de cada heladera durante el período seleccionado. Al igual que en la sección anterior, la generación del reporte se configura mediante dos filtros seleccionados en la vista general: la heladera de interés y el rango temporal deseado.

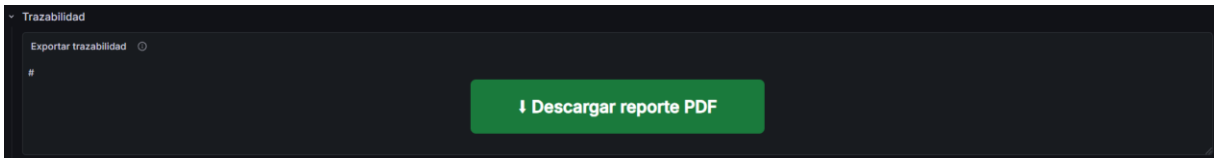


Figura 2.17 Reportes – Plataforma de monitoreo

2.4 Firmware y lógica del sistema

El firmware se encuentra en el ESP32-C3 Super Mini y se programó utilizando el IDE de Arduino; se divide en dos etapas bien diferenciadas: una secuencia de arranque que se ejecuta una única vez al encender el dispositivo y un loop operativo que corre de forma continua. La Figura 2.18 muestra en detalle el flujo correspondiente a la primera etapa.

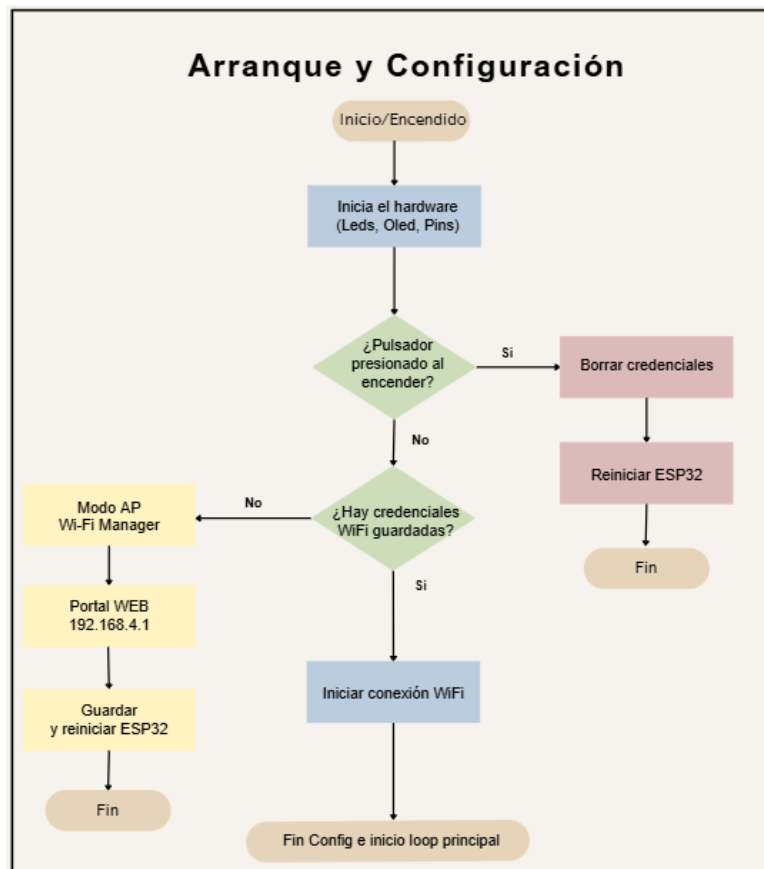


Figura 2.18 Diagrama de arranque y configuración

Como se observa en el diagrama, la secuencia comienza con la inicialización del hardware: se configura la pantalla OLED, el sensor DS18B20, los pines de salida de los LEDs y el buzzer y el sistema de archivos LittleFS, utilizado para almacenar datos de forma persistente en la memoria flash del microcontrolador. A continuación, el sistema evalúa si el pulsador está presionado en el momento del encendido. En ese caso, el flujo se desvía hacia la derecha del diagrama: se borran las credenciales Wi-Fi almacenadas y el dispositivo se reinicia. Este mecanismo permite cambiar la configuración de la red a la cual está conectado el dispositivo sin necesidad de modificar ni recompilar el firmware.

Si no hay reset solicitado, el sistema verifica si existen credenciales Wi-Fi guardadas previamente. Como se aprecia en la rama izquierda del diagrama, en caso de que no las haya, el dispositivo entra en modo de configuración Wi-Fi: genera su propia red inalámbrica y presenta un portal web accesible desde cualquier dispositivo móvil en la dirección 192.168.4.1, donde el operador ingresa el nombre y la contraseña de la red local como se observa en la Figura 2.19. Una vez guardadas las credenciales, el dispositivo se reinicia y se conecta automáticamente. Si las credenciales ya existen, se omite esta etapa y el flujo continúa: se inicia la conexión Wi-Fi y el sistema pasa a la etapa operativa.

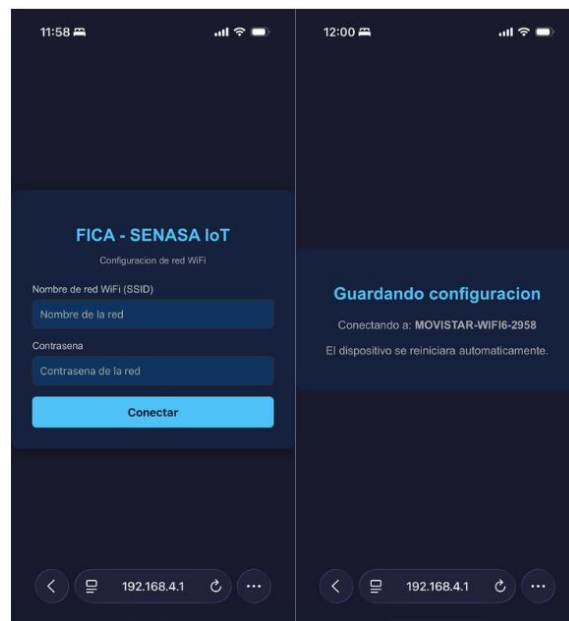


Figura 2.19 Interfaz de configuración Wi-Fi

Una vez completa la secuencia de arranque, el firmware entra en el loop principal el cual se observa en la Figura 2.20 que se ejecuta de forma continua e indefinida. Este loop se diseñó para ser completamente no bloqueante, lo que significa que ninguna de las tareas que lo

componen detiene la ejecución del resto. Esto garantiza que el dispositivo responda siempre de manera inmediata ante cualquier evento, ya sea una pulsación del botón, una lectura del sensor o un cambio en el estado de la conexión, independientemente de si hay o no conexión a la red en ese momento.

En cada ciclo, el loop comienza leyendo el estado del pulsador para detectar si el operador desea silenciar o reactivar la alarma sonora. Luego gestiona la conexión Wi-Fi y MQTT en segundo plano donde se reintenta la conexión automáticamente sin interrumpir el resto de las funciones.

Cada segundo, el sistema toma una lectura del sensor DS18B20 y verifica si el valor obtenido es válido. Si el sensor no responde, se activa una alerta de error la cual se visualiza a través del display OLED. Si la lectura es válida, se evalúa si la temperatura se encuentra dentro del rango establecido por SENASA para la conservación de vacunas bovinas, que es de 2°C a 8°C. En caso de que la temperatura esté dentro de ese rango, se enciende el LED verde y la pantalla muestra el estado como correcto. Si la temperatura está fuera del rango, se enciende el LED rojo y el buzzer emite un pitido intermitente como señal de alerta. Si el operador silencia la alarma mediante el pulsador, la pantalla lo indica con el estado ALT/MUTE y el silenciado se cancela automáticamente cuando la temperatura vuelve al rango aceptable.

Cada 5 minutos, el sistema publica la medición. Antes de transmitirla, estructura los datos en formato JSON de la siguiente manera:

```
"heladera": "heladera1",  
  
"temperatura": 4.9,  
  
"timestamp Unix": 1747524313
```

El campo “heladera” identifica la unidad de almacenamiento de origen, permitiendo que el sistema escale a múltiples dispositivos en el futuro. El campo temperatura contiene el valor medido por el sensor DS18B20 en grados Celsius con un decimal de precisión. El campo “timestamp Unix” corresponde a la marca temporal de la medición, lo que garantiza la trazabilidad temporal de cada registro.

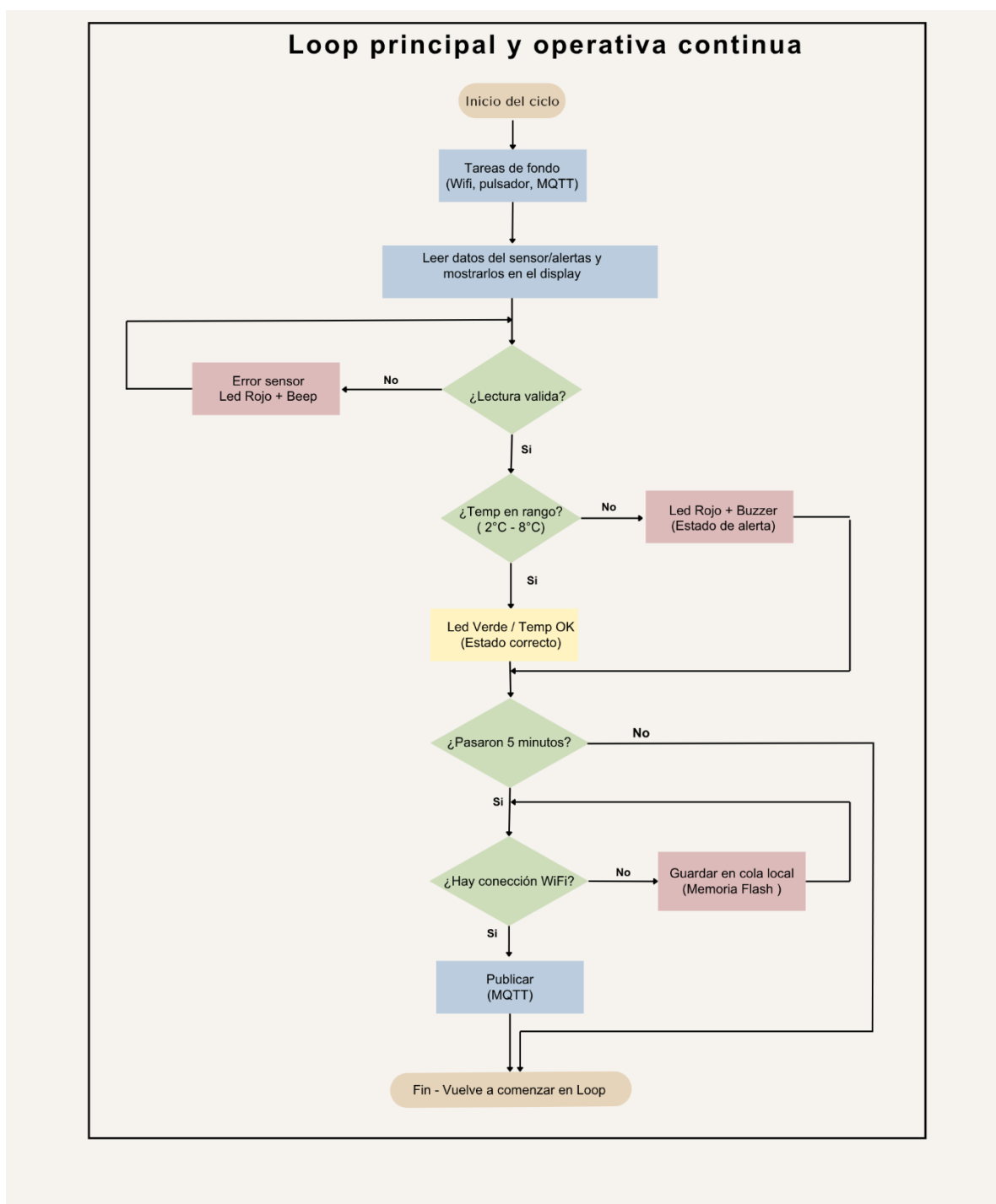


Figura 2.20 Diagrama principal y operativa continua

CAPÍTULO 3: Fabricación y puesta en marcha

3.1 Fabricación de placa PCB

Una de las etapas fundamentales para garantizar un dispositivo compacto fue la fabricación de la placa PCB. Al momento de definir el método de fabricación, se analizó y evaluó entre tres alternativas con el objetivo de obtener un resultado óptimo. Los métodos considerados fueron: impresión láser + ácido, grabado láser y fresado CNC.

El método que se seleccionó fue el fresado CNC, debido a la disponibilidad de una fresadora CNC de escritorio y con el objetivo de integrar herramientas CAD/CAM en el proceso de fabricación.

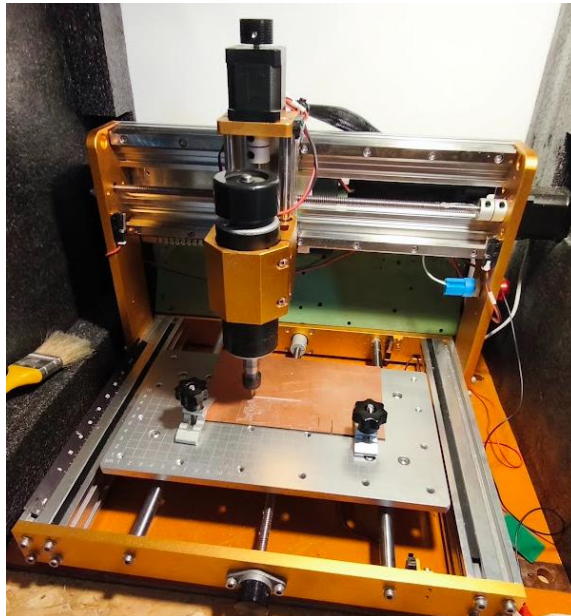


Figura 3.1 Mini fresadora CNC

El proceso de fabricación se estructuró en tres etapas fundamentales y una última etapa de soldado:

3.1.1 Selección de fresas

La obtención de un resultado óptimo en el fresado de una placa PCB depende en gran medida de la correcta selección de fresas, ya que estas son las responsables tanto del desbaste del cobre para trazar las pistas como de la realización de los agujeros correspondientes. Para el

fresado de pistas se seleccionó una fresa en forma de V de 3 mm con un ángulo de 30°; para los orificios de los componentes se utilizó una fresa de 1 mm y para el troquelado de la placa y los orificios de sujeción se empleó una fresa de 2 mm tal como se observa en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Fresas seleccionadas

3.1.2 Generación del G-code y Configuración del Mecanizado

La generación del G-code constituyó una de las etapas críticas del proceso. Mediante el software FlatCAM se configuró el conjunto de parámetros necesarios para el mecanizado, tal como se observa en la Figura 3.3, entre los cuales se destacan: velocidad de avance, profundidad de trabajo de la fresa, cantidad de pasadas, altura de despegue en el eje Z durante los desplazamientos y vaciado de áreas, entre otros.

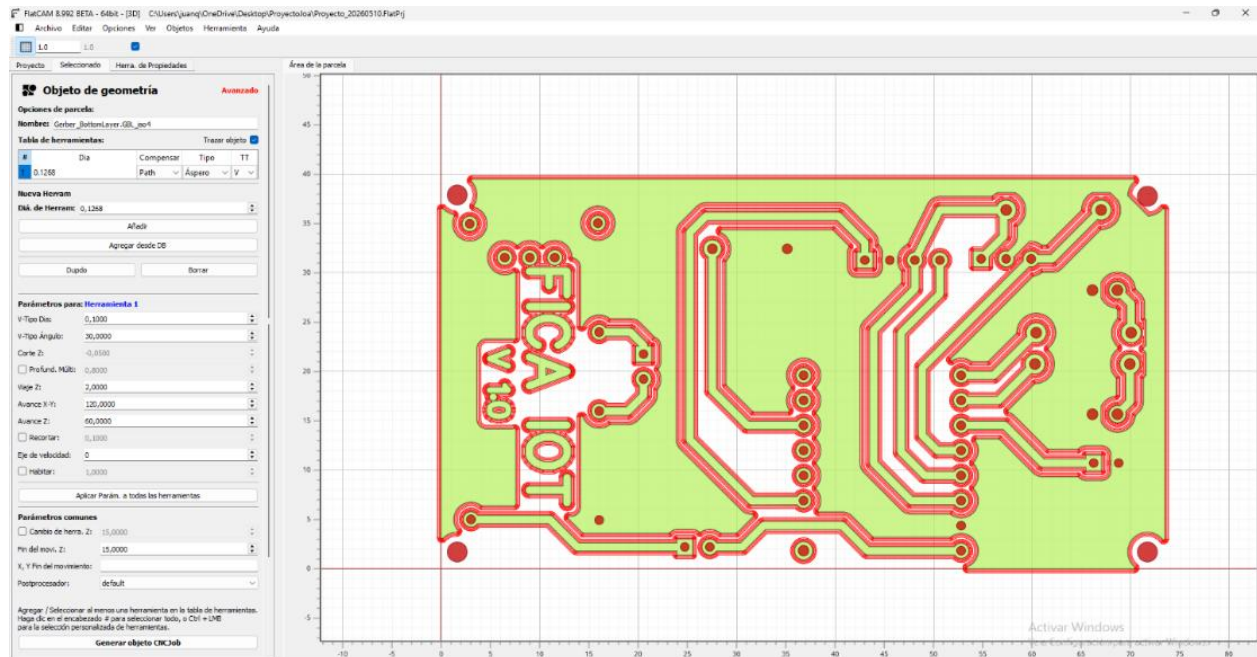


Figura 3.3 Configuración y ajustes de fresado en FlatCAM

3.1.3 Proceso de Fresado

Durante el proceso de fresado se ejecutó el G-code y se configuraron manualmente determinados parámetros de la máquina, como la velocidad de giro del husillo, el Z offset y el cero relativo, entre otros. Además, se realizaron los cambios de herramientas para las diferentes etapas del proceso (fresado de pistas, agujereado y troquelado). El resultado del proceso de fresado se observa en la Figura 3.4.

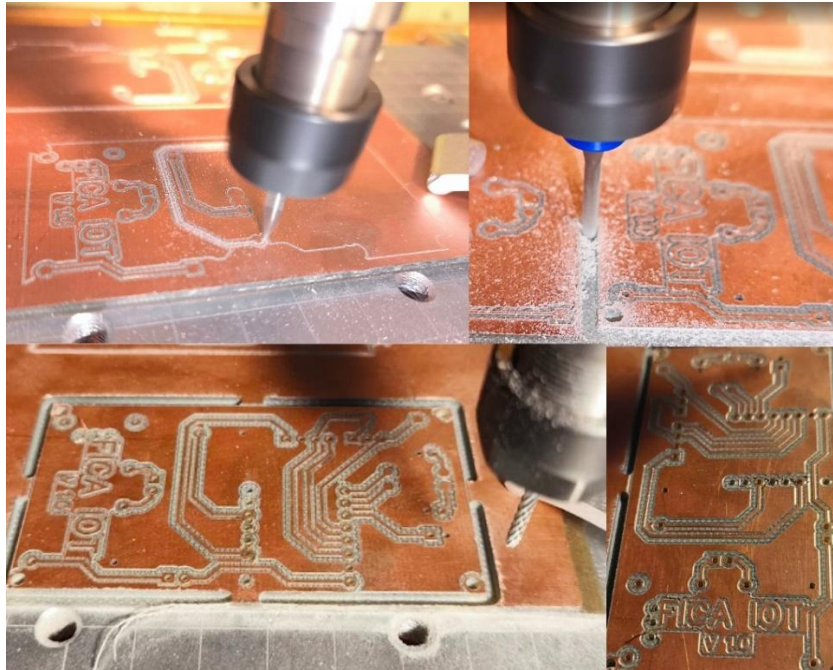


Figura 3.4 Proceso de fresado CNC de la placa PCB

3.1.4 Soldado de componentes en placa PCB

Una vez concluido el proceso de fabricación de la placa PCB se procedió a realizar el montaje y soldado de los componentes electrónicos en la misma. Antes de iniciar el ensamblaje, se llevó a cabo una inspección visual de la placa para verificar la correcta definición de las pistas, la ausencia de cortocircuitos entre ellas y la limpieza general de la superficie. Esta etapa resultó fundamental para evitar fallas durante el funcionamiento del circuito.

Para el proceso de soldado se utilizó un conjunto de herramientas: un multímetro digital para corroborar las conexiones eléctricas y verificar la continuidad en las pistas del circuito; una estación de soldado con temperatura regulable, que permitió trabajar con precisión sobre los componentes de tipo THT, garantizando uniones eléctricas y mecánicas de calidad; y herramientas manuales como pinzas de punta fina y sierra de mano para corte de terminales.

El procedimiento de soldado se realizó de forma ordenada, comenzando por los componentes de menor altura como resistencias y luego con los de mayor tamaño, como conectores y zócalo del microcontrolador. En cada componente soldado se realizó la verificación con el multímetro para confirmar la correcta unión eléctrica y descartar posibles fallas o puentes no deseados entre pistas adyacentes. El resultado del proceso fue satisfactorio y se logró concluir

la etapa de soldado de manera exitosa, obteniendo una placa completamente ensamblada, tal como se observa en la Figura 3.5.

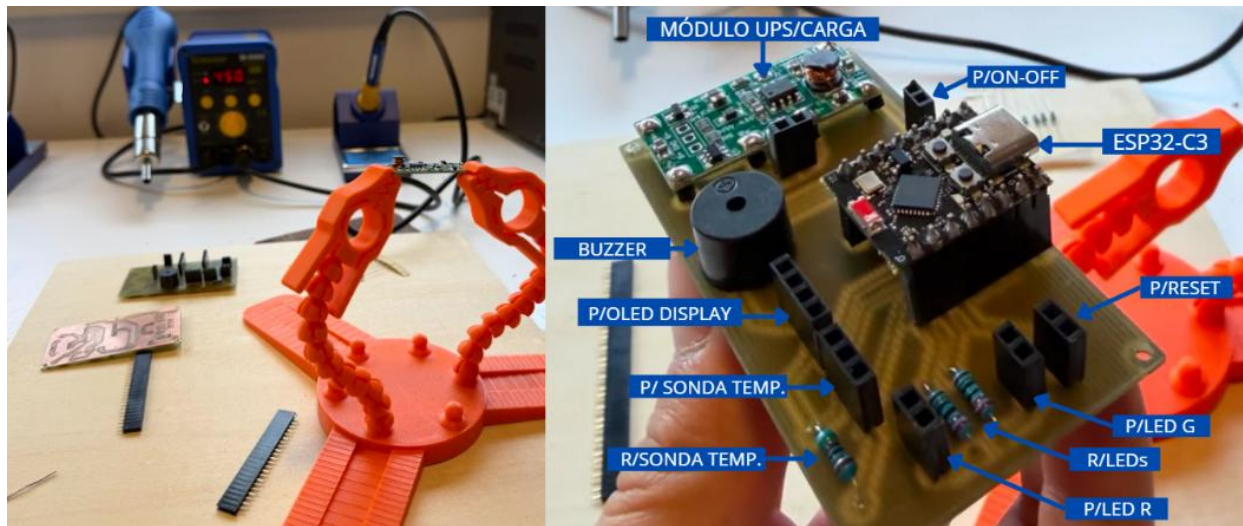


Figura 3.5 Soldado de componentes en placa PCB

3.2 Fabricación del gabinete

Esta etapa consistió en materializar el diseño del gabinete desarrollado en la fase previa, llevando a la práctica todas las características y especificaciones ya establecidas. El objetivo del gabinete es alojar de forma compacta, ordenada y protegida todos los componentes que integran el dispositivo: el microcontrolador ESP32-C3 Super Mini, la placa PCB, la batería 18650, la pantalla OLED, LEDs y demás componentes.

El proceso de fabricación se llevó a cabo utilizando impresión 3D. Para ello se utilizó una impresora Bambu Lab A1 Combo tal como se observa en la Figura 3.6, equipada con el módulo multicolor AMS, lo que permitió la impresión de las secciones decorativas y funcionales en múltiples colores en una misma impresión.



Figura 3.6 Impresora 3D Bambulab A1 Combo

La configuración de los parámetros de impresión se realizó en el Slicer Bambu Studio, tal como se visualiza en la Figura 3.7. En esta instancia se definieron las variables clave, como la altura de capa, densidad y patrón de relleno, temperatura de extrusión, velocidades de impresión y configuración de soportes. Asimismo, se asignaron los colores correspondientes a cada sección de las piezas para su correcta impresión multicolor.

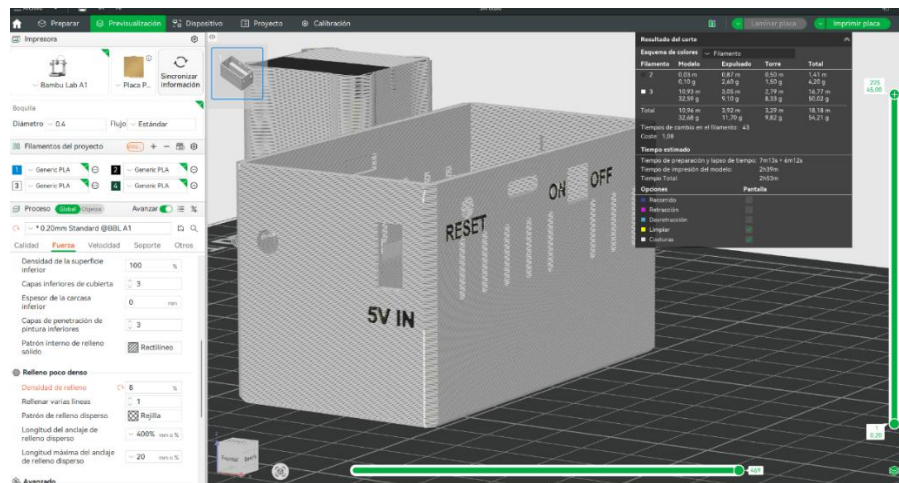


Figura 3.7 Laminado en BambuStudio

En cuanto a la selección del material, para esta etapa de prototipado se optó por el PLA, un plástico de origen biodegradable ampliamente utilizado en prototipado rápido por su facilidad de impresión y su bajo costo. Esta elección resultó adecuada para las condiciones de operación

previstas del dispositivo: instalación en espacios interiores a temperatura ambiente, sin exposición directa a la radiación solar y sin requerimientos de resistencia a esfuerzos mecánicos significativos. El PLA satisface plenamente estos requerimientos, resultando un material idóneo para la etapa de prototipado.

Concluida la configuración, se procedió a la fabricación de las piezas. El resultado obtenido fue satisfactorio, obteniéndose un gabinete que cumplió con las especificaciones de diseño establecidas, tanto en lo dimensional como en lo funcional e incluyendo también detalles estéticos y la identidad requerida para el prototipo como se observa en la Figura 3.8.



Figura 3.8 Gabinete impreso en 3D

3.3 Ensamble del dispositivo

El resultado favorable obtenido en cada una de las etapas anteriores permitió avanzar hacia el ensamble y la puesta en marcha del dispositivo. Si bien esta instancia representó una etapa crítica del proceso, el riguroso control y los múltiples testeos previos brindaron la base necesaria para afrontarla con seguridad.



Figura 3.9 Ensamble del dispositivo

El proceso de ensamble se realizó siguiendo una secuencia ordenada, orientada a garantizar la integridad del sistema. Como primera medida, se colocó la batería de litio 18650 y su correspondiente soporte en la zona inferior del gabinete. Seguidamente, se procedió a montar la placa PCB sobre la cual se encuentran soldados el microcontrolador, el módulo UPS, las resistencias y los conectores, fijándola en su posición dentro del gabinete. Una vez asegurada la placa, se instaló en sus cavidades correspondientes el pulsador de usuario, el interruptor de encendido/apagado y el conector de alimentación USB-C, el resultado se observa en la Figura 3.9.

En la siguiente etapa, se incorporó la sonda de temperatura DS18B20, asegurándola mediante un soporte diseñado específicamente para resistir esfuerzos durante el uso normal del dispositivo; dicho soporte fue fijado con dos tornillos M2×5. Posteriormente, se conectaron los indicadores LED rojo y verde a sus pines correspondientes. Para finalizar se colocaron los 6 imanes de neodimio de alta potencia en la parte posterior del gabinete, se fijó la pantalla OLED en la contratapa y se procedió al cierre del dispositivo mediante la colocación de la tapa, completando así el proceso de ensamble.

El resultado final del proceso de ensamble se ilustra en la Figura 3.10, donde se visualiza el dispositivo completamente integrado y listo para su puesta en marcha.



Figura 3.10 Resultado final del dispositivo ensamblado

3.4 Puesta en marcha

La puesta en marcha del dispositivo se llevó a cabo en un entorno doméstico, utilizando la heladera del domicilio como unidad de almacenamiento de prueba. Esta decisión resultó adecuada dado que las condiciones de operación de una heladera doméstica presentan características equivalentes a las de los establecimientos donde se almacenan las vacunas bovinas y la temperatura de trabajo del equipo se encuentra dentro del rango de 2°C a 8°C establecido por SENASA.



Figura 3.11 Fijación magnética del dispositivo

En primera instancia, se adhirió magnéticamente el dispositivo a la pared exterior de la heladera, tal como se ilustra en la Figura 3.11. La sonda de temperatura DS18B20 se colocó en el interior del equipo sumergida en un frasco de vidrio con 200 ml de agua en su interior, configuración conocida como medición en bulbo húmedo, tal como se ve en la Figura 3.12. Esta práctica es recomendada ya que las sondas sumergidas en un líquido reflejan con mayor precisión la temperatura real de las vacunas almacenadas que las sondas expuestas al aire interior del equipo, dado que amortiguan las variaciones térmicas de corta duración producidas, por ejemplo, al abrir la puerta de la heladera, que resultan irrelevantes para la trazabilidad de la cadena de frío. Adicionalmente, el volumen de agua del frasco actúa como masa térmica que simula el contenido líquido presente en las heladeras de uso real.



Figura 3.12 Sonda en bulbo húmedo y encendido

Una vez instalado el dispositivo, se procedió a encenderlo y conectarlo de forma continua a la fuente de alimentación de 5V mediante el conector USB-C. El dispositivo permaneció en operación durante más de siete días consecutivos, período durante el cual se sometió a distintas condiciones de prueba similares a las de uso cotidiano.

CAPÍTULO 4: Resultados Obtenidos

A fin de evaluar el desempeño del sistema desarrollado bajo condiciones representativas de uso real, se sometió al prototipo a un período de prueba continuo superior a una semana. Durante dicho período, se expuso el sistema a distintas situaciones operativas, entre las que se incluyeron cortes de suministro eléctrico para verificar la activación del modo de respaldo energético, condiciones de temperatura fuera del rango establecido y operación ininterrumpida para evaluar la estabilidad general del sistema.

4.1 Disponibilidad de datos del sistema

Durante el período de prueba continua, el sistema registró lecturas de temperatura a intervalos regulares. Con el fin de someter al sistema a condiciones de operación intensiva y obtener una muestra más significativa, se redujo el intervalo de muestreo de 5 minutos (valor correspondiente al uso real) a 1 minuto. Luego se contabilizó el total de lecturas esperadas en función de dicho intervalo y se las comparó contra las lecturas efectivamente registradas en la base de datos, con el fin de determinar la disponibilidad del sistema.

Tabla 4.1 Disponibilidad de datos del sistema

Parámetro	Valor
Duración de la prueba	5 días
Intervalo de muestreo	1 minuto
Lecturas esperadas	7200
Lecturas obtenidas	7192
Disponibilidad del sistema	99,88%

Este resultado demuestra que el sistema posee una elevada robustez para aplicaciones de monitoreo continuo, incluso bajo condiciones de pérdida de conectividad y cortes del suministro eléctrico.

4.2 Validación del sensor

Con el propósito de verificar el comportamiento del sensor DS18B20 integrado en el dispositivo prototipo, se realizó una comparación de sus mediciones con las obtenidas mediante un termómetro digital de referencia de resolución de 0,1°C y precisión declarada ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). El proceso de toma de mediciones se llevó a cabo de manera simultánea, posicionando ambas sondas en el interior de la heladera, precisamente en el frasco utilizado como bulbo húmedo.

Tabla 4.2 Validación del sensor

Medición	Temperatura disp. de referencia	Temperatura dispositivo IoT	Diferencia	Error Porcentual
1	2,3°C	2,3°C	0°C	0,0%
2	3,6°C	3,8°C	0,2°C	3,3%
3	4,1°C	4,1°C	0°C	0,0%
4	4,9°C	4,8°C	0,1°C	1,7%
5	5,4°C	5,6°C	0,2°C	3,3%
6	6,5°C	6,3°C	0,2°C	3,3%
7	7,7°C	7,6°C	0,1°C	1,7%
8	8,9°C	8,8°C	0,1°C	1,7%
Desviación promedio			0,125°C	1,9%

4.3 Autonomía del sistema ante corte de suministro eléctrico

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del módulo de respaldo energético ante una interrupción del suministro eléctrico, se simuló un corte de luz desconectando el dispositivo de la red y registrando el comportamiento del sistema durante dicho período. Se midió el tiempo durante el cual el dispositivo continuó operando con normalidad alimentado únicamente por la batería 18650, manteniendo la lectura y transmisión de datos sin interrupciones.

Tabla 4.3 Validación ante cortes

Parámetro	Valor
Horas de corte simulado	12 Horas
Inicio del corte simulado	10:05 AM
Fin del corte simulado	10:05 PM
Estado del sistema durante la prueba	Operativo, sin interrupciones detectadas
Lecturas registradas durante el corte	720

El sistema mantuvo su operación durante 12 horas con alimentación exclusiva de batería, continuando con la transmisión de datos al servidor sin pérdida de registros. Este resultado

evidenció que el respaldo energético cumplió satisfactoriamente su función, garantizando la trazabilidad de los datos ante eventuales cortes de suministro.

4.4 Respuesta ante alarmas

Una de las instancias fundamentales de evaluación del sistema consistió en someter el dispositivo a condiciones de temperatura que excedieran los límites operativos establecidos, con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema de alertas tanto a nivel del dispositivo como en la plataforma de monitoreo. Para ello, se expuso el sensor a temperaturas por encima del límite superior de 8°C y por debajo del límite inferior de 2°C, registrando en cada caso la respuesta del hardware mediante la activación de la alarma sonora y visual integrada en el dispositivo y la respuesta de la plataforma Grafana, donde se esperaba la actualización del estado y la visualización del evento fuera de rango.

4.4.1 Simulación 1: Exposición al límite inferior de temperatura

Como parte de esta simulación, se buscó exponer el dispositivo al límite inferior del rango operativo, por lo que se decidió introducir la sonda en el freezer de la misma heladera. Como resultado, el dispositivo respondió de manera automática activando el sistema de alertas integrado: el buzzer emitió el pitido advirtiendo una temperatura fuera de rango, el indicador LED cambió de estado verde a estado rojo, y en la pantalla del dispositivo se visualizó la leyenda "ALERTA" tal como se observa en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Dispositivo en estado Alerta - Límite negativo

Por otro lado, en la plataforma de visualización se observó que el estado del sistema pasó de "OK" a "ALERTA" y el valor de temperatura cambió automáticamente de color verde a color rojo, indicando la temperatura registrada en ese momento. Asimismo, en el gráfico histórico de control se evidenció cómo la curva de temperatura descendió por debajo del umbral inferior definido, representado mediante una línea de color rojo, lo cual confirmó la correcta detección del evento fuera de rango tal como se observa en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Interfaz en estado Alerta – Rango negativo

4.4.2 Simulación 2: Exposición al límite superior de temperatura

En la segunda simulación, se buscó exponer el dispositivo al límite superior del rango operativo. Para ello, la sonda se retiró del interior de la heladera y se expuso directamente a temperatura ambiente. Dado que la temperatura del entorno superó el umbral máximo establecido de 8°C, el sistema respondió de manera automática, de forma análoga a la simulación anterior: el buzzer activó su señal sonora de advertencia, el indicador LED cambió de estado verde a estado rojo y en la pantalla del dispositivo se visualizó la leyenda "ALERTA" como se ve en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Dispositivo en estado Alerta – Límite positivo

En la plataforma de visualización, el estado del sistema pasó a "ALERTA" y el valor de temperatura se representó en color rojo, reflejando la temperatura ambiente registrada en ese momento. En el gráfico histórico de control se observó cómo la curva de temperatura ascendió por encima del umbral superior definido, superando la línea de color rojo que delimita el límite máximo permitido, confirmando la correcta detección del evento fuera de rango también en el extremo superior del intervalo operativo.



Figura 4.4 Interfaz en estado Alerta – Rango positivo

4.5 Generación de reportes automáticos

Como parte de la evaluación del sistema, se verificó el correcto funcionamiento del módulo de generación de reportes automáticos. Para ello, se sometió al sistema a la generación de reportes en distintos intervalos de tiempo, con el objetivo de comprobar que los datos registrados fueran exportados de manera correcta, coherente y en el formato adecuado para su posterior uso por parte del personal destinado a esta función.

Se generaron reportes para diferentes rangos temporales, abarcando períodos de corta, media y larga duración, evaluando en cada caso la completitud de la información incluida, la correcta representación de los eventos registrados y la integridad de los datos exportados. En la Figura 4.5 se observa un ejemplo de los reportes generados. En el anexo 3 se encuentran más reportes automáticos generados a modo de ejemplo.

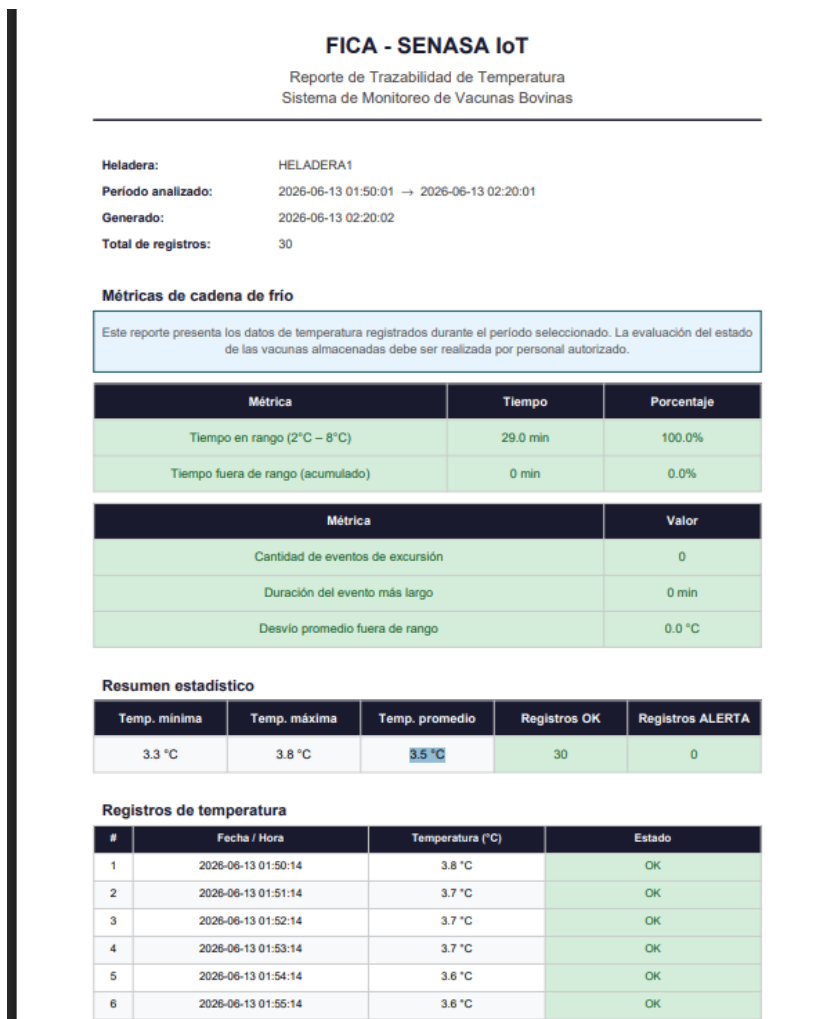


Figura 4.5 Reportes de trazabilidad automáticos

CAPÍTULO 5: Análisis de costos

El análisis de costos asociado al desarrollo de un prototipo resulta complejo, dado que cuantificar con precisión la totalidad de las horas destinadas a su diseño, desarrollo e iteración representa una tarea de difícil evaluación. No obstante, se realizó un esfuerzo por estimar los aspectos más relevantes y cuantificables del proceso, con el objetivo de contar con una referencia económica concreta en caso de que el sistema fuera adoptado a mayor escala. El análisis se estructuró en tres secciones: costos de hardware, costos de fabricación y costos de infraestructura. De manera complementaria, se incluyó una estimación de las horas requeridas para el ensamblado de un dispositivo, con el propósito de brindar una referencia temporal orientativa para una eventual replicación.

5.1 Costos de hardware del dispositivo

En esta sección se detallaron los costos asociados a los componentes electrónicos y módulos que conformaron el dispositivo prototipo. Se relevó el precio de cada elemento de manera individual, considerando los valores de mercado al momento de su adquisición, con el fin de determinar el costo unitario de hardware necesario para replicar el dispositivo.

Tabla 5.1 Costos de hardware

Ítem	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal en pesos
ESP 32-C3 Super Mini	1	\$6800	\$6800
Batería 18650	1	\$7500	\$7500
Módulo UPS 5v 1A	1	\$8000	\$8000
Pantalla Oled 1,3"	1	\$8500	\$8500
Sonda 2M Ds18b20	1	\$5500	\$5500
Buzzer activo	1	\$2000	\$2000
Led Rojo	1	\$150	\$150
Led Verde	1	\$150	\$150
Imán neodimio alta potencia	6	\$300	\$1800
Conector USB C hembra	1	\$3200	\$3200
Fuente 5v con cable	1	\$5500	\$5500
PLA x 80g	0,08	\$19500	\$1560
Interruptor	1	\$600	\$600
Pulsador	1	\$500	\$500
Adicionales	1	\$1500	\$1500
Total			\$53260

5.2 Costos de fabricación

Se analizaron los costos vinculados al proceso físico de fabricación del dispositivo, comprendiendo tanto el tiempo de impresión 3D requerido para la producción del gabinete como el tiempo de fresado CNC empleado en la fabricación de la placa de circuito impreso.

Tabla 5.2 Costos de fabricación

Item	Sistema utilizado	Cantidad de horas	Costo / Hora	Subtotal en pesos
Gabinete	Impresión 3D	1,6	\$2500	\$4000
Tapa	Impresión 3D	1	\$2500	\$2500
Placa PCB	Fresado CNC	0,5	\$3500	\$1750
Total				\$8250

El costo total del prototipo, considerando tanto los componentes de hardware como los insumos y procesos de fabricación, ascendió a \$61.510 (pesos argentinos). Se tomó como referencia el tipo de cambio oficial vigente al 10 de junio de 2026, equivalente a \$1.425 por dólar estadounidense, dicho monto representa un costo aproximado de USD 43,16, valor que se encuentra dentro del límite de USD 60 establecido como referencia para el presente proyecto.

5.3 Costos de infraestructura

5.3.1 Infraestructura actual

Se analizó en primera instancia los costos asociados al despliegue y operación del servicio de monitoreo en el entorno actual de prototipo. En este escenario, el sistema operó íntegramente sobre infraestructura propia, haciendo uso exclusivo de herramientas de código abierto y software sin costo de licenciamiento. Esta decisión permitió mantener los costos de infraestructura en cero, representando una ventaja significativa durante la etapa de desarrollo y validación del sistema.

Tabla 5.3 Costos de infraestructura actual

Servicio	Herramienta	Ejecución	Costo Anual en USD
Plataforma de visualización	Grafana free	Local	\$0
Flujo de datos	Node-RED	Local	\$0
Contenedorización	Docker	Local	\$0
Base de datos	InfluxDB	Local	\$0
Servidor	PC propia	Local	\$0
Total			\$0

5.3.2 Infraestructura proyectada

En segunda instancia, se elaboró una proyección de costos orientada a un entorno de uso real. Este escenario contempló la contratación de un servidor privado virtual (VPS) para alojar los servicios del sistema, el uso de plataformas de visualización en modalidad de pago debido a la necesidad de aumentar la cantidad de usuarios y el registro de un dominio web institucional. Dicha proyección tuvo como objetivo brindar una estimación concreta del costo operativo anual en caso de que el sistema fuera adoptado a mayor escala por parte de SENASA.

Tabla 5.4 Costos de infraestructura proyectada

Servicio	Herramienta	Ejecución	Costo Anual en USD
Plataforma de visualización	Grafana Pro	Nube	\$200
Flujo de datos	Node-RED	Nube	\$0
Contenedorización	Docker	Local - Nube	\$0
Base de datos	InfluxDB	Nube	\$0
Servidor privado	VPS	Nube	\$50
Dominio Web	Hostinger	Nube	\$10
Total			\$260

5.4 Estimación del tiempo de ensamblado

Se realizó una estimación de los minutos necesarios para llevar a cabo el proceso completo de ensamblado de un dispositivo. Dado que los tiempos pueden variar en función de la experiencia del operador y las condiciones de trabajo, los valores indicados deben interpretarse como una referencia aproximada y no como tiempos exactos. Dicha estimación tuvo como objetivo brindar una referencia temporal orientativa para una eventual replicación del prototipo a mayor escala.

Tabla 5.5 Tiempos estimados de ensamblado

Tarea	Tiempo estimado en minutos
Soldado de componentes en placa PCB	40
Inspección y verificación de la placa PCB	20
Ensamblado del gabinete	60
Carga del firmware	15
Puesta en marcha y configuración inicial	60
Total estimado	195 minutos (3 horas y 15 minutos)

CAPÍTULO 6: Mejoras futuras y Conclusiones

6.1 Mejoras futuras

Tras concluir el presente trabajo, se identificaron diversas líneas de mejora que podrían servir como base para futuros desarrollos.

En primer lugar, se propone el diseño de una placa de circuito impreso personalizada con el microcontrolador ESP32 integrado, con miras a su fabricación a escala mediante proveedores internacionales, lo cual permitiría reducir el tamaño del conjunto electrónico y mejorar los costos del dispositivo. En línea con esto, se sugiere explorar componentes alternativos e importados que posibiliten una reducción aún mayor del costo unitario de fabricación, manteniendo las prestaciones técnicas del sistema actual.

En cuanto al diseño mecánico, se plantea la revisión y optimización del gabinete del dispositivo con el objetivo de lograr un diseño más compacto que el actual, aprovechando las dimensiones reducidas de la nueva placa propuesta.

Desde el punto de vista de la infraestructura, se propone la migración del sistema hacia un servidor privado (VPS), abandonando la dependencia del servidor local actualmente utilizado. Esta transición haría uso de la arquitectura de servicios ya desarrollada, garantizando una transición ordenada y sin pérdida de funcionalidad.

Finalmente, se considera de alto valor la incorporación de un sistema de análisis predictivo que permita detectar desvíos tempranos de temperatura en tiempo real, anticipándose a posibles excursiones térmicas antes de que estas superen los umbrales críticos establecidos por SENASA.

6.2 Conclusión

El presente Trabajo Final permitió alcanzar de manera exitosa los objetivos planteados. Se desarrolló un dispositivo IoT funcional, capaz de monitorear la temperatura de heladeras destinadas al almacenamiento de vacunas bovinas y visualizar dicha información en tiempo real a través de una plataforma de monitoreo remoto. El sistema demostró un comportamiento correcto en todas sus funcionalidades: el monitoreo continuo de temperatura, la activación de

alarmas ante excursiones térmicas, la generación automática de reportes de trazabilidad y la operación ante cortes de suministro eléctrico.

Más allá de sus capacidades técnicas, el dispositivo fue concebido desde sus etapas tempranas de diseño no solo como un prototipo, sino como una solución escalable, orientada a una implementación real en el campo. Su diseño compacto, su bajo costo de fabricación y la infraestructura de software desarrollada constituyen una base sólida para una futura adopción por parte de SENASA en establecimientos productivos.

La ruptura de la cadena de frío no deja huellas visibles ya que una vacuna puede perder su capacidad inmunogénica sin que el establecimiento lo advierta, comprometiendo silenciosamente el resultado de las campañas de vacunación. Frente a este riesgo, contar con un sistema capaz de detectar y documentar tempranamente los desvíos de temperatura constituye un aporte concreto a la seguridad sanitaria, ya que permite intervenir a tiempo y generar acciones que garanticen el correcto estado de las vacunas almacenadas.

El desarrollo del presente trabajo resultó particularmente significativo, dado que representa una solución concreta ante una problemática real planteada por un organismo nacional como SENASA, integrando en su resolución los conocimientos y herramientas propios de la ingeniería mecatrónica. Haber podido aportar, aunque sea en una medida acotada, a esta problemática constituye uno de los aspectos de mayor valor de todo el proceso llevado a cabo.

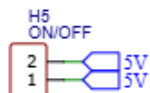
Referencias Bibliográficas

- [1] Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria, "Módulo I: Etiopatogenia y epidemiología de la fiebre aftosa," Biblioteca SENASA, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.senasa.gob.ar/items/show/3826>. [Acceso: 3 may. 2026].
- [2] Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA), "Fiebre aftosa," WOA. [En línea]. Disponible en: <https://www.woah.org/es/enfermedad/fiebre-aftosa/>. [Acceso: 10 may. 2026].
- [3] Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria, "Módulo V: Brucelosis - Introducción," Biblioteca SENASA, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.senasa.gob.ar/items/show/3830>. [Acceso: 13 may. 2026].
- [4] A. Bahga y V. Madiseti, *Internet of Things: A Hands-On Approach*. Georgia: Arshdeep Bahga & Vijay Madiseti, 2014.
- [5] Santander Open Academy, "Dispositivos IoT: qué son y ejemplos," abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/Dispositivos-IoT.html>. [Acceso: 10 may. 2026].
- [6] A. Spasojevic, "¿Qué es un dispositivo IoT?," PhoenixNAP Glosario de TI, abr. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://phoenixnap.mx/glosario/iot-dispositivo>. [Acceso: 13 may. 2026].
- [7] SD Industrial, "Protocolos de comunicación" jun. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://sdindustrial.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-que-son/>. [Acceso: 13 may. 2026].
- [8] A. Silberschatz, H. F. Korth y S. Sudarshan, *Fundamentos de bases de datos*, 5.^a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2006.
- [9] OMSA – Organización Mundial de Sanidad Animal, "Fiebre aftosa," *woah.org*, jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.woah.org/es/enfermedad/fiebre-aftosa/>. [Acceso: 01 jun.2026].
- [10] ANSI/ISA-101.01-2015, *Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*, International Society of Automation (ISA), 9 jul. 2015.

Anexo/s

ANEXO 1: Esquema eléctrico PCB

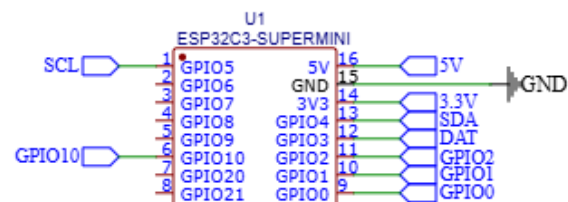
INTERRUPTOR



INDICADORES LED



MICROCONTROLADOR



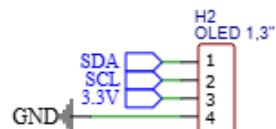
RESET



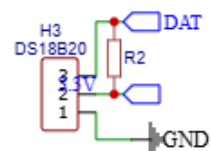
ALERTA SONORA



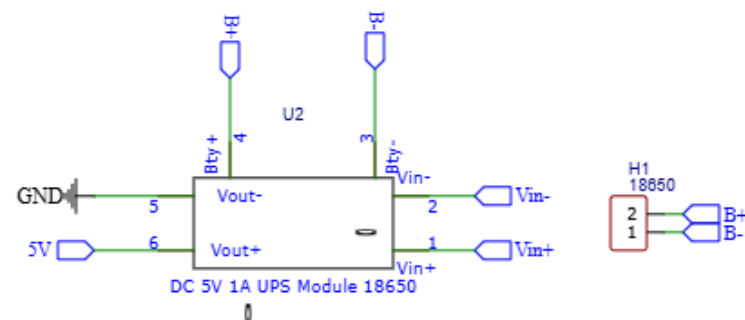
PANTALLA OLED



SENSOR DS18B20

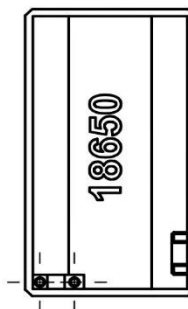
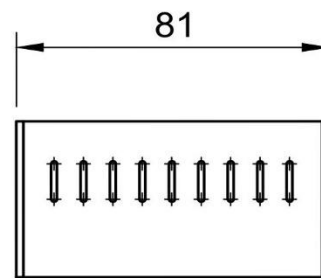
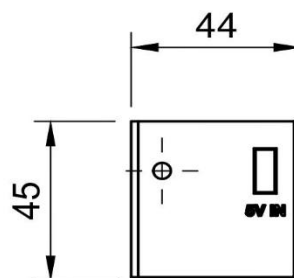
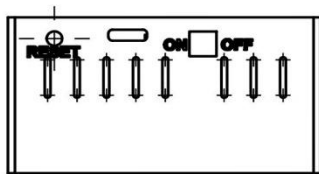
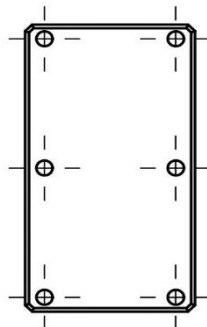
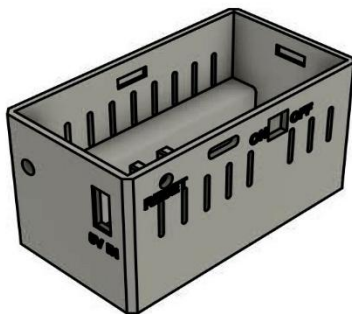


MÓDULO UPS + BATERIA + ALIMENTACIÓN

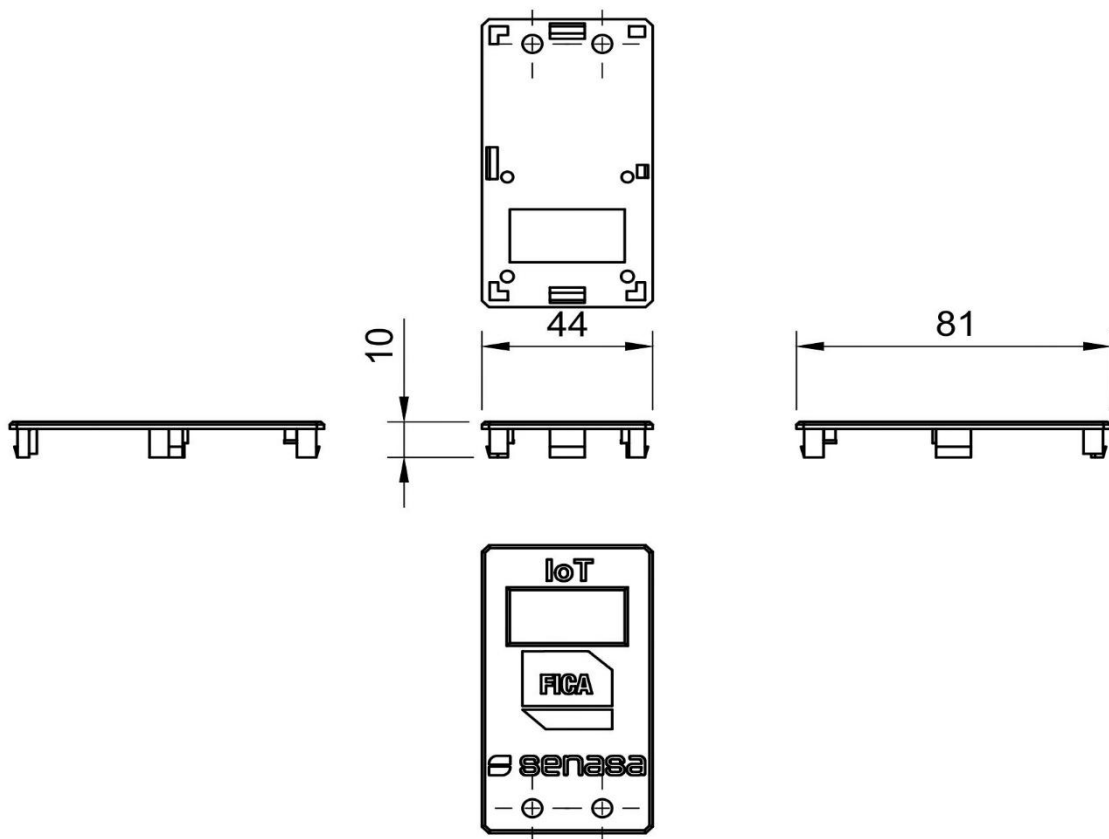
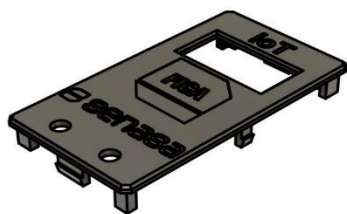


TITLE: ESQUEMA ELÉCTRICO - PLACA PCB		REV: 1.0
Company: FICA UNSL		Sheet: 1/1
Date: 2026-05-03		Drawn By: VERGARA

Anexo 2: Planos gabinete



1	Escala 1:2	Estudiante Ariel Joaquín Vergara	Título Case ppal	
FICA UNSL		Carrera Ing. Mecatrónica	Metodo de fabricación provisto Impresión 3D	
		PIEZA Carcasa v2.3	Material PLA	
			Rev.	Fecha 15/05/2026
			Hoja 1/1	



2	Escala 1:2	Estudiante Vergara Ariel Joaquín	Título Tapa	
FICA UNSL		Carrera Ing. Mecatrónica	Método de fabricación provisto Impresión 3D	
		Pieza Tapa v2.3	Material	
		Rev.	Date of issue 15/05/2026	Hoja 1/1

Anexo 3: Reportes de trazabilidad

Anexo 4: Repositorio del proyecto