

Proyecto final de Ingeniería Mecatrónica

Sistema Modular de Control Ambiental para
Cámaras Frigoríficas



Facultad de Ciencias
de la Alimentación

Autor: Alexis Nahuel Medina

Tutores: Ing. Ignacio Terenzano
Ing. German Hachmann
Ing. Juan Ramos

Última modificación: 6 de Octubre 2024

Avisos

Licencia

Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons “Atribución-NoComercial 4.0 Internacional”](#).



Sobre el documento

Este documento es el desarrollo del proyecto final para obtener el título de [Ingeniero en Mecatrónica](#). Carrera de la Facultad de Ciencias de la Alimentación de la [Universidad Nacional de Entre Ríos](#).

Agradecimientos

La culminación de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de muchas personas. En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Liliana y José, por su amor infinito y su incansable apoyo. Gracias por creer en mí desde el primer momento y por brindarme todas las oportunidades para desarrollarme. A Sebastián, mi hermano, por acompañarme en esta travesía. A mis amigos y amigas, por todos los momentos de apoyo y acompañamiento. Y finalmente, a mis docentes, Germán Hachman, Juan Ramos e Ignacio Terenzano, por su guía y sus valiosos consejos. Gracias por compartir sus conocimientos conmigo y por inspirarme a seguir creciendo como profesional.

Abstract

El Sistema Modular de Control Ambiental (SMCA) es un proyecto innovador desarrollado para optimizar las condiciones ambientales en cámaras frigoríficas industriales. El SMCA combina módulos de sensado y control de temperatura y humedad con sistemas embebidos de bajo consumo y una interfaz de usuario intuitiva. El sistema se valida mediante un prototipo implementado en la cámara de secado de carnes del Laboratorio de Industrias Cárnica (LIC) de la Universidad Nacional de Entre Ríos. Este documento describe el diseño, desarrollo y validación del sistema, así como su impacto económico, ambiental y social. Los resultados obtenidos sugieren que el SMCA no solo mejora la eficiencia energética y reduce los costos operativos, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad y calidad de vida de las industrias que lo adopten.

Contenido

Introducción	7
Capítulo 1	9
Identificación del problema	9
1.1 Diagnóstico de la situación actual	10
1.2 Justificación	11
Capítulo 2	12
Definición del proyecto	12
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
2.3 Alcance	13
2.4 Limitaciones	14
2.5 Diagnóstico de la situación actual	14
2.6 Propuesta	17
2.7 Metodología	17
Capítulo 3	19
Diseño conceptual de la solución	19
3.1 Estado del arte	20
3.2 Marco teórico de la solución	23
3.3 Metodología implementada	25
3.4 Cronograma del Proyecto	26
3.5 Generación de conceptos	28
3.6 Selección de concepto	29
3.7 Selección de materiales y dispositivos	29
3.8 Arquitectura del producto	30
3.9 Diagrama de contexto del SMCA	30
Capítulo 4	32
Ingeniería del Proyecto	32
4.1 Introducción	33
4.2 Selección de Componentes	33
4.2.1 Microcontrolador ESP32	33
4.2.2 Sensores de Temperatura y Humedad	35
4.2.3 Control de Potencia ON/OFF	39
4.2.4 Módulo de Control de Potencia Modulada	40
4.2.5 Conectores	41
4.2.6 Batería	42
4.3 Desarrollo de los Módulos	48
4.3.1 Módulo de Sensado	49
4.3.2 Módulo de Control	53

4.3.3 Módulos de Control de Potencia	55
4.4 Diseño de Software	60
4.4.1 Introducción al Diseño de Software	60
4.4.2 Requisitos del Software	61
4.4.3 Arquitectura del Software	61
4.4.4 Detalles de Implementación	63
4.4.5 Gestión de Energía y Optimización	65
4.4.6 Pruebas y Validación del Software	65
4.5 Diseño Constructivo del SMCA	66
4.5.1 Criterios de Diseño para Protección IP65	66
4.5.2 Balance entre Protección y Funcionalidad	67
4.5.3 Uso de Impresión 3D	67
4.6 Diseño de la PCB	68
4.6.1 Diseño Unificado de la PCB de Control y Sensado	68
4.6.2 Diseño de la PCB del Módulo de Control de Potencia	68
4.6.3 Fabricación de las PCBs	69
4.6.4 Ensamblaje y Montaje	69
Capítulo 5	72
Estudio Económico	72
5.1 Introducción	73
5.2 Inversión Inicial	73
5.2.1 Costos de Componentes	73
5.2.2 Costos de Fabricación y Ensamblaje de las PCBs	75
5.2.3 Costos de Desarrollo y Prototipado	76
5.2.4 Mano de Obra	78
5.2.5 Infraestructura y Equipos de Prueba	78
5.2.6 Total de Inversión Inicial	78
5.3 Costos Operativos	79
5.3.1 Consumo Energético	79
5.3.2 Mantenimiento y Reemplazo de Componentes	80
5.3.3 Actualización del Software	81
5.4 Ahorros Operativos y Beneficios	81
5.4.1 Ahorro Energético	81
5.4.2 Ahorro en Mantenimiento	81
5.4.3 Mejora en la Calidad del Producto	81
5.4.4 Incremento en la Productividad	81
5.5 Análisis de Retorno de la Inversión (ROI)	82
5.5.1 Cálculo del ROI	82
5.5.2 Período de Retorno de la Inversión (Payback Period)	82
5.6 Proyecciones a Largo Plazo	82
5.8 Resumen final	83

Capítulo 6	84
Estudio de Impacto Ambiental y Social	
creo conveniente aclarar que son consideraciones generales, que deberían determinarse en cada caso particular, ya que este desarrollo se aplica a la planta piloto de la facultad. Si no se hace esa salvedad, queda como un capítulo netamente teórico de impactos positivos y negativos generales.	84
Análisis del Impacto Ambiental	84
Análisis de Impacto Social	85
Conclusiones y Recomendaciones	87
Indice de tablas	89
Indice de figuras	89
Figura 2.1 [Incluir diagrama básico del sistema inicial][2].	89
Figura 3.1 Componentes de un sistema embebido (nivel lógico) [3].	89
Referencias	90

Introducción

Sobre el trabajo

Este proyecto nace como parte del desarrollo del Sistema Modular de Control Ambiental (SMCA), orientado a la optimización de cámaras frigoríficas industriales, con especial enfoque en la cámara de secado de carnes del Laboratorio de Industrias Cárnicas (LIC) de la Facultad de Ciencias de la Alimentación, Universidad Nacional de Entre Ríos.

El proyecto comienza en 2024, durante la elaboración del trabajo final de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, y aborda una problemática real identificada en el LIC. El proceso de secado de productos cárnicos presentaba fluctuaciones que atentaban contra la calidad y el rendimiento del producto elaborado, debidas principalmente a un sistema de control deficiente de las variables críticas, como la temperatura y la humedad. Al detectar esta necesidad, surge la idea de diseñar un sistema modular y adaptable que pudiera mejorar estos procesos y ser aplicable a otras cámaras frigoríficas.

Uso de sistemas de control ambiental en la industria

En la industria moderna, los sistemas de control ambiental juegan un papel crucial en la optimización de las condiciones operativas y productivas. Estos sistemas son utilizados en una amplia gama de sectores, incluyendo la agroindustria, la manufactura, la farmacéutica y la logística, entre otros. En cámaras frigoríficas, invernaderos, plantas de procesamiento y almacenamiento de productos sensibles, el control de parámetros como temperatura, humedad y calidad del aire es esencial. Los sistemas de control buscan mantener condiciones ambientales óptimas para garantizar la calidad, prolongar la vida útil de los productos y mejorar la eficiencia energética. Las principales características de estos sistemas incluyen la capacidad de monitoreo en tiempo real, la automatización de procesos y la integración con sistemas de gestión industrial.

Tecnologías de control similares o competidoras del Sistema Modular de Control Ambiental

Existen diversas tecnologías de control ambiental que compiten con el **Sistema Modular de Control Ambiental (SMCA)**. Entre ellas, se encuentran los sistemas basados en PLC (Controladores Lógicos Programables), los sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y los sistemas BMS (Building Management Systems). Estas tecnologías comparten la capacidad de monitoreo y control de variables ambientales, pero a menudo requieren instalaciones complejas y costosas. Además, suelen ser menos flexibles a la hora de adaptarse a diferentes configuraciones de cámaras o requerimientos específicos, lo que puede limitar su efectividad en aplicaciones especializadas como el secado de productos cárnicos. Adicionalmente, los **termostatos digitales programables**, aunque más simples y económicos, permiten un control básico de la temperatura y humedad en entornos controlados. Sin embargo, su enfoque en variables limitadas y su capacidad reducida de monitoreo remoto los

hacen menos adecuados en comparación con el **SMCA**, que es más modular y capaz de gestionar múltiples variables como la humedad, temperatura, peso de productos y otras condiciones ambientales.

Características principales del SMCA

El **SMCA** se destaca por su enfoque modular y adaptable, diseñado específicamente para optimizar las condiciones ambientales en cámaras frigoríficas industriales. A diferencia de los sistemas tradicionales, el **SMCA** permite una fácil integración sin necesidad de realizar modificaciones estructurales significativas en las instalaciones existentes. Sus principales características incluyen la capacidad de **sensado inalámbrico**, un **módulo centralizado de control**, y una **interfaz de usuario intuitiva** que facilita el monitoreo y ajuste de las condiciones en tiempo real, tanto de manera local como remota. El **SMCA** es ideal para aplicaciones que requieren alta flexibilidad, como la conservación de productos perecederos y la aclimatación de cultivos al frío.

Enfoque del proyecto

Este proyecto se centra en el desarrollo e implementación del **SMCA** en cámaras frigoríficas industriales. El objetivo principal es demostrar cómo este sistema puede mejorar significativamente la gestión de las condiciones ambientales, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo los costos asociados con la conservación ineficiente de productos. El proyecto incluye el diseño del hardware y software del **SMCA**, su implementación en un entorno real, y la evaluación de su desempeño a través de pruebas y análisis de datos.

En el primer capítulo se pretende describir el sector de las cámaras frigoríficas industriales y la problemática actual en la gestión de condiciones ambientales. Se identifican las principales variables técnicas que impactan negativamente en el rendimiento y la conservación de productos, así como los desafíos que enfrentan los sistemas de control existentes.

El segundo capítulo tiene como objetivo definir el proyecto del SMCA, estableciendo claramente sus objetivos, alcance, limitaciones y metodología. En este capítulo se presenta la propuesta del sistema y se detallan los pasos metodológicos que se seguirán para alcanzar los resultados esperados.

En el tercer capítulo, se desarrolla el diseño conceptual del SMCA. Se exponen los fundamentos teóricos que sustentan el sistema, se describe la metodología implementada en el diseño, y se seleccionan los materiales y dispositivos clave. El capítulo culmina con la presentación de la arquitectura del producto.

El cuarto capítulo está dedicado a la ingeniería detallada del SMCA. Se describen las especificaciones técnicas del hardware y software, así como la distribución geométrica y de planta del sistema. Además, se presenta un cronograma detallado que guía la implementación del proyecto.

El quinto capítulo realiza un análisis económico del proyecto, incluyendo las inversiones necesarias, los costos y el presupuesto total. Se evalúa la viabilidad del SMCA, considerando el retorno de la inversión y los ahorros operativos potenciales.

En el sexto capítulo se aborda el impacto ambiental y social del SMCA. Se analizan los posibles efectos positivos y negativos del sistema, y se proponen planes de mitigación para minimizar impactos adversos, asegurando que el sistema contribuya a la sostenibilidad y bienestar social.

El séptimo y último capítulo sintetiza las conclusiones del proyecto, destacando los logros alcanzados y las limitaciones encontradas. Además, se presentan recomendaciones para la implementación y futuras mejoras del SMCA, así como sugerencias para su expansión y adaptación a otras aplicaciones.

Capítulo 1 - Identificación del problema

1.1 Diagnóstico de la situación actual

En la actualidad, muchas cámaras frigoríficas industriales dependen de sistemas de control ambiental que presentan varias limitaciones. Estos sistemas suelen requerir modificaciones estructurales costosas para adaptarse a diferentes tipos de cámaras y no proporcionan un monitoreo en tiempo real ni una gestión eficiente de las condiciones ambientales. Como resultado, se produce una conservación inadecuada de productos y un aumento en los costos operativos.

Un caso específico es el de la **cámara de secado de carnes** del **Laboratorio de Industrias Cárnica (LIC)** de la **Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias de la Alimentación**. En esta cámara, el sistema actual de control de las variables no cumple con los requisitos mínimos para un control adecuado. Si bien los procesos de secado se llevan a cabo, los errores presentes en el sistema entorpecen estos procesos, lo que afecta la calidad del secado y, en consecuencia, la eficiencia del laboratorio. La falta de un control preciso sobre las variables ambientales, como la temperatura y la humedad, limita la capacidad de optimizar el proceso de secado de carnes, un factor clave en la industria cárnica.

Además de las limitaciones específicas de la cámara del LIC, un problema generalizado en las cámaras frigoríficas es la falta de flexibilidad para adaptarse a las variaciones en las condiciones ambientales. Los sistemas actuales no logran ajustarse de manera eficiente a los cambios en temperatura y humedad, y no ofrecen la flexibilidad necesaria para optimizar las condiciones específicas requeridas por diferentes tipos de productos. Esto provoca variaciones poco óptimas en los procesos, lo que puede resultar en pérdidas económicas significativas debido a productos mal conservados o inapropiadamente procesados.

Los sistemas actuales, como el que opera en la cámara del LIC, utilizan sensores internos cableados y dataloggers sin conexión a internet, funcionando en un modo de control "on-off". Este enfoque presenta varias limitaciones. Aunque los sensores y los dataloggers permiten la recopilación de datos, la falta de conectividad a internet impide el monitoreo remoto y los ajustes automáticos de las condiciones ambientales. Las variables deben modificarse manualmente, lo que no permite una respuesta rápida a las condiciones cambiantes ni la implementación de un control automatizado basado en la evaluación continua del sistema.

Estas deficiencias generan ineficiencias y riesgos considerables. La incapacidad de ajustar las condiciones de manera remota y en tiempo real impide una gestión óptima del ambiente dentro de las cámaras frigoríficas, y el hecho de depender de sistemas manuales desconectados plantea una serie de desafíos operativos y económicos para el laboratorio. Esto es particularmente problemático en un entorno donde la precisión en el control de variables es clave para la calidad del secado de carnes (Figura 1.1. Componentes de una cámara frigorífica).



Figura 1.1 Componentes de una cámara frigorífica [1].

En el relevamiento realizado en la cámara de secado del LIC, se identificaron los componentes y condiciones actuales del sistema. Este sistema es responsable de controlar el ambiente interno de la cámara para asegurar las condiciones óptimas de secado de carnes. A continuación, se detallan los componentes principales del sistema, junto con su potencia y tipo de control (ver Tabla I).

Tabla I: Componentes del sistema de secado en la cámara del LIC				
Componente	Función	Entrada/Salida	Tipo de control	Potencia
Sistema frigorífico	Enfriamiento del ambiente	Salida	ON/OFF	500W
Sistema frigorífico (Secador de aire interno)	Control de la humedad interna	Salida	ON/OFF	500W
Sensor de humedad y temperatura	Medición de temperatura y humedad	Entrada	Analógica (No se identificó el modelo)	N/A

Controlador MT-530E Super	Control del sistema general	Entrada/Salida	ON/OFF	N/A
Luz interna	Iluminación de la cámara	Salida	ON/OFF	15W
Cooler 100 mm, 12V DC	Ventilación interna	Salida	ON/OFF	N/A
Resistencia calorífica	Estabilización de la temperatura	Salida	Control de potencia	2kW
Humidificador	Humidificación del ambiente	Salida	ON/OFF	500W
Potenciómetro	Control de la velocidad de ventiladores	Entrada	Control de potencia variable	N/A

Contexto operativo del sistema

El sistema de secado en la cámara del LIC presenta varios problemas operativos que han sido detectados por el personal del laboratorio. Uno de los principales inconvenientes es que la velocidad del aire no es gestionada automáticamente por el controlador de la cámara, sino que se ajusta manualmente mediante un potenciómetro externo. Este ajuste debe realizarse en función de la velocidad de aire requerida para cada etapa del proceso de secado, lo que genera una operación menos eficiente y más propensa a errores humanos.

El laboratorio sigue un proceso de secado por etapas, basado en la pérdida de humedad del producto, denominada “merma”. Este proceso se controla manualmente tomando una muestra testigo del producto, que representa un estándar para medir la pérdida de humedad. Se asume que todos los productos dentro de la cámara tienen el mismo peso inicial y que, a medida que el producto testigo pierde humedad, los demás se secan de la misma forma. A medida que avanza el secado, se ajustan los parámetros de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire según el porcentaje de peso perdido por el producto testigo o merma (ver Tabla II).

Tabla II. Etapas del proceso de secado en la cámara del LIC

Etapa	Peso/Merma	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (HR%)	Velocidad del aire (m/s)
Etapa 1	0 a 10%	20°C	90-94%	0.6 - 1.0 m/s
Etapa 2	10 a 20%	15°C	85-90%	0.3 - 0.5 m/s
Etapa 3	20 a 30%	12°C	80-85%	0.1 m/s

Uno de los principales desafíos que enfrenta el laboratorio es la **precisión de las mediciones del sensor de humedad**. Según el personal, el sensor no es capaz de realizar

mediciones confiables en los rangos críticos de 85% a 90% de humedad relativa, lo que dificulta el seguimiento y control preciso del proceso de secado. Esto puede afectar negativamente la calidad final del producto, ya que es esencial mantener los parámetros dentro de rangos específicos para cada etapa del secado.

Funcionamiento del sistema actual:

El controlador MT-530E Super gestiona las operaciones clave del sistema mediante sus salidas relé, controlando el sistema frigorífico, el humidificador (actualmente no funcional) y la renovación del aire. Sin embargo, la **velocidad del aire** es ajustada manualmente mediante un potenciómetro, lo que introduce una operación menos automatizada y sujeta a errores. La **resistencia calorífica** se activa únicamente cuando la temperatura desciende por debajo de los límites establecidos.

Recomendaciones para la mejora del sistema:

1. Tablero de control de potencia:

- Implementar un tablero de potencia que incluya protección contra cortocircuitos, sobrecargas y puesta a tierra. Esto es crucial para garantizar la seguridad operativa del sistema y proteger los componentes sensibles frente a fallos eléctricos.

2. Etiquetado y organización:

- Asegurar que cada componente esté **claramente etiquetado** dentro del sistema. Esto facilitará las tareas de mantenimiento y reducirá los riesgos de errores durante la operación.

3. Mejora del humidificador:

- Instalar una **entrada física adecuada** para el sistema de humidificación. El hecho de que el humidificador esté dentro de la cámara provoca que se humedezca excesivamente, lo que ha llevado a su avería. Se recomienda reposicionarlo o agregar protección para evitar futuros fallos.

4. Automatización de la velocidad del aire:

- Incorporar la **velocidad del aire** al control centralizado, eliminando la necesidad de ajustes manuales mediante potenciómetro. Esto permitirá que la velocidad del aire se ajuste automáticamente según las necesidades de cada etapa del secado, mejorando la eficiencia y precisión del sistema.

5. Mejorar el sensor de humedad:

- Se recomienda reemplazar o calibrar adecuadamente el **sensor de humedad** para garantizar mediciones precisas, especialmente en los rangos críticos entre el 85% y 90% de humedad relativa. Esto permitirá un control más efectivo de las etapas del secado, asegurando que el proceso se realice de manera adecuada.

1.2 Propuesta

El SMCA se propone como una solución modular y adaptable que puede integrarse fácilmente en diversas cámaras frigoríficas industriales. El sistema se basa en el uso de módulos de sensado inalámbricos para medir la temperatura y la humedad, un módulo de control central para procesar los datos y gestionar los actuadores, y una interfaz de usuario para el monitoreo y ajuste de las variables del proceso.

1.3 Justificación

La falta de un sistema eficiente de control ambiental en la cámara de secado de carnes del **LIC** impacta negativamente en la conservación de productos y en la productividad de los procesos que dependen de esta cámara. No abordar este problema puede llevar a pérdidas en la producción, incorrecta maduración de productos y un aumento en las fallas humanas debido a la necesidad de ajustes manuales constantes. La implementación de un sistema modular y adaptable como el **SMCA** es esencial para mitigar estos problemas. Esta tecnología permite una integración flexible y escalable, sin necesidad de modificar la infraestructura existente. El sensado inalámbrico facilita el monitoreo continuo de variables críticas como la temperatura y la humedad, permitiendo obtener datos en tiempo real sin las limitaciones del cableado convencional. A su vez, el control centralizado asegura una respuesta rápida y automática ante variaciones en las condiciones ambientales, ajustando los parámetros de manera precisa para mantener un entorno óptimo.

El SMCA permitirá un control preciso y en tiempo real de las variables críticas como la temperatura y la humedad, asegurando una conservación óptima de los productos, una mayor productividad y una reducción de errores humanos.

Además, la mejora del sistema tendría un impacto significativo en la reducción de desperdicios y la optimización de los procesos productivos. Al aplicar el SMCA en la cámara del LIC, no solo se mejorará la calidad y eficiencia del secado de carnes, sino que también se contribuirá a la sostenibilidad ambiental mediante la reducción del desperdicio de alimentos. La capacidad de monitorear y ajustar las condiciones ambientales en tiempo real permitirá una conservación y maduración más efectiva, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia general del sistema.

Capítulo 2 - Definición del proyecto

2.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar un SMCA para optimizar las condiciones ambientales en cámaras frigoríficas industriales mediante el uso de tecnologías de sensado inalámbrico y control centralizado.

2.2 Objetivos específicos

1. **Desarrollar módulos de sensado inalámbrico** capaces de medir con precisión la temperatura y la humedad en diversas cámaras frigoríficas.
2. **Implementar un módulo de control central** que procese los datos de los módulos de sensado y sensores extras que se conectan externamente (ejemplo, celda de carga, medición de co₂, etc.) y gestione mediante señales de control los actuadores para mantener las condiciones ambientales óptimas.
3. **Crear una interfaz de usuario intuitiva** que permita monitorear y ajustar las condiciones ambientales, tanto local como remotamente.
4. **Validar el SMCA en diversas aplicaciones** industriales, incluyendo la conservación y maduración de productos alimenticios, así como la aclimatación de plantines, para asegurar su eficacia y eficiencia en dichos contextos.

2.3 Alcance

- **Diseño y desarrollo de hardware y software:** Se llevará a cabo el diseño y desarrollo tanto del hardware como del software necesarios para los módulos de sensado y control del SMCA. Esto incluirá la selección de componentes, programación de microcontroladores, y la creación de una interfaz de usuario intuitiva.
- **Prototipado e implementación del sistema:** Se procederá con el prototipado de los módulos desarrollados, seguido de su implementación en cámaras frigoríficas seleccionadas. Esta fase incluye pruebas y validación en entornos reales para asegurar que el sistema funcione de manera eficiente bajo las condiciones específicas de cada cámara.
- **Documentación y publicación de resultados:** Durante y después de la validación del sistema, se recopilará y documentará toda la información relevante, incluyendo datos de rendimiento, análisis de eficiencia, y cualquier ajuste realizado. Los resultados obtenidos serán publicados y presentados en un informe técnico detallado.

2.4 Limitaciones

- **Recursos financieros y materiales:** La disponibilidad limitada de fondos afectó el desarrollo del proyecto al restringir la selección de componentes de mayor calidad o de última tecnología. Como resultado, se optó por alternativas más económicas, lo que pudo impactar el rendimiento y la durabilidad de algunos módulos. Además, la restricción financiera limitó la cantidad de prototipos desarrollados y las pruebas que se pudieron realizar en distintas cámaras frigoríficas.
- **Tiempo limitado para pruebas y validación:** Debido a los plazos ajustados del proyecto, no fue posible realizar un extenso periodo de pruebas en una amplia variedad de entornos industriales. Aunque el sistema fue validado en una instalación específica, la falta de tiempo para realizar pruebas en otras cámaras frigoríficas limitó la capacidad de identificar y resolver posibles desafíos adicionales, lo que podría haber mejorado la versatilidad del sistema.
- **Capacidades técnicas y desafíos tecnológicos:** A pesar de contar con una sólida formación técnica, la integración de tecnologías avanzadas como RTOS, redes de comunicación, bases de datos y servidores presentó retos importantes. Estas áreas demandaron investigación y adaptación adicional para asegurar un funcionamiento eficiente del sistema, lo que implicó mayor inversión de tiempo en fases específicas del proyecto, como la gestión en tiempo real, la conectividad de los módulos y la recolección de datos.

2.7 Metodología

1. **Fase de diseño:**
 - **Identificación de requisitos:** Recopilación de necesidades y especificaciones de las cámaras frigoríficas seleccionadas.
 - **Diseño de hardware y software:** Desarrollo de los módulos de sensado y control, y la interfaz de usuario.
 - **Prototipado:** Creación de prototipos de los módulos y validación inicial en entornos controlados.
2. **Fase de implementación:**
 - **Integración del sistema:** Instalación de los módulos de sensado y control en cámaras frigoríficas seleccionadas.
 - **Configuración y calibración:** Ajuste de los sensores y el módulo de control para asegurar precisión y eficiencia.
 - **Desarrollo de la interfaz de usuario:** Programación y prueba de la interfaz para asegurar una interacción intuitiva y eficiente.
3. **Fase de pruebas y validación:**
 - **Pruebas unitarias:** Evaluación individual de los componentes del sistema.
 - **Pruebas de integración:** Verificación del funcionamiento conjunto de todos los módulos.

- **Validación en campo:** Pruebas del sistema en cámaras frigoríficas reales, recopilación de datos y análisis de resultados.
4. **Fase de evaluación y ajuste:**
- **Análisis de resultados:** Evaluación de la eficacia del SMCA en mejorar las condiciones ambientales y su impacto en la conservación y maduración de productos.
 - **Ajustes y optimización:** Realización de mejoras y ajustes necesarios basados en los resultados obtenidos durante la validación.
 - **Documentación:** Elaboración de informes detallados y documentación técnica para el uso y mantenimiento del sistema.

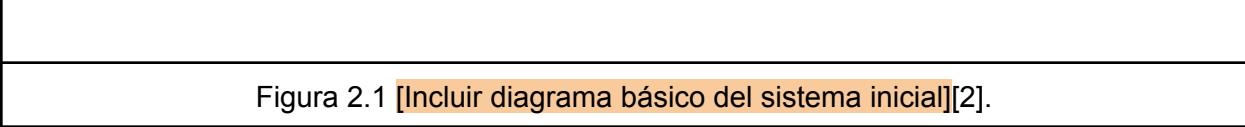


Figura 2.1 [Incluir diagrama básico del sistema inicial][2].

Capítulo 3 - Diseño conceptual de la solución

3.1 Estado del arte

En el ámbito industrial, los sistemas de control ambiental desempeñan un papel crucial en la regulación de variables críticas como la temperatura, la humedad, así como la calidad del aire. Esto resulta especialmente relevante en sectores donde la conservación y calidad del producto son esenciales, como la agroindustria, la alimentación, la farmacéutica, y el almacenamiento en cámaras frigoríficas. A continuación, se describen las tecnologías y sistemas utilizados actualmente en la industria, junto con sus principales limitaciones.

Sistemas de control basados en PLC (*Programmable Logic Controllers*)

Los PLC son ampliamente utilizados en entornos industriales para automatizar procesos, incluyendo el control ambiental en cámaras frigoríficas. Los PLC son conocidos por su robustez y fiabilidad en aplicaciones de control, permitiendo la automatización de tareas como el ajuste de la temperatura y la humedad a través de sensores conectados a los módulos de control.

- **Ventajas:** Los sistemas basados en PLC son altamente personalizables y confiables, permitiendo una gran flexibilidad en la configuración de procesos. Además, son capaces de operar en entornos industriales exigentes.
- **Limitaciones:** A pesar de su robustez, los PLC suelen requerir un mantenimiento intensivo, son costosos y no ofrecen soluciones inalámbricas integradas, lo que puede complicar la instalación en cámaras existentes. La falta de conectividad a internet en muchos PLC limita su capacidad para ofrecer monitoreo remoto o análisis en tiempo real.

Sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

Los sistemas SCADA son ampliamente utilizados para el control y monitoreo de variables en procesos industriales. Estos sistemas permiten la supervisión en tiempo real de una red de sensores y actuadores, gestionando grandes volúmenes de datos y alertas sobre el estado de la operación.

- **Ventajas:** Ofrecen una supervisión completa del proceso y pueden integrarse con múltiples sensores para controlar condiciones ambientales. También permiten una gestión centralizada de varios procesos, lo cual es crucial para grandes instalaciones.
- **Limitaciones:** A pesar de sus capacidades avanzadas, los sistemas SCADA suelen ser costosos y complejos de implementar, especialmente en instalaciones pequeñas o

medianas. Aunque generalmente utilizan PLC como parte de su infraestructura, no siempre están optimizados para el uso de tecnologías inalámbricas o el control en tiempo real.

Termostatos digitales programables

En diversas cámaras frigoríficas, los termostatos digitales se emplean para regular de manera sencilla la temperatura y la humedad, activando o desactivando sistemas de enfriamiento o calefacción según los parámetros preestablecidos por el operador.

- **Ventajas:** Estos dispositivos son asequibles y de fácil instalación, brindando una solución básica de control en pequeños entornos de almacenamiento.
- **Limitaciones:** A pesar de su simplicidad, su capacidad es limitada, ya que no permiten un monitoreo continuo ni ajustes dinámicos en función de factores adicionales, como la carga de productos o el estado ambiental. Como se observó en el Controlador MT-530E Super instalado en el LIC, muchos controladores en cámaras frigoríficas carecen de conectividad remota, lo que dificulta la supervisión en tiempo real y obliga a la introducción manual de parámetros cada vez que el proceso lo requiere, aumentando el riesgo de errores operativos.

Sistemas BMS (*Building Management Systems*)

Los BMS son sistemas diseñados para la gestión y control de los servicios de un edificio, incluyendo el control ambiental en grandes instalaciones como centros de almacenamiento y cámaras frigoríficas. Estos sistemas permiten la integración de sensores y actuadores en una plataforma centralizada.

- **Ventajas:** Ofrecen una solución integral para la gestión del ambiente, la seguridad y el control energético de grandes infraestructuras.
- **Limitaciones:** Al igual que SCADA, los sistemas BMS suelen ser costosos y sobredimensionados para aplicaciones en cámaras frigoríficas pequeñas o medianas. Aunque utilizan tecnologías similares, como PLC o sistemas embebidos, están más orientados a la gestión completa de edificios, y su flexibilidad en entornos industriales de menor tamaño es limitada.

Sistemas inalámbricos emergentes

En los últimos años, han surgido soluciones de control ambiental basadas en tecnologías inalámbricas, que permiten una mayor flexibilidad en la instalación y operación. Estos sistemas suelen usar Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) para monitorear variables en tiempo real, permitiendo una mayor integración con el Internet de las Cosas (IoT).

- **Ventajas:** Estos sistemas ofrecen facilidad de instalación, una menor necesidad de infraestructura física y la posibilidad de monitoreo remoto a través de plataformas en la nube.
- **Limitaciones:** Todavía presentan algunos desafíos en términos de confiabilidad en entornos industriales con interferencias electromagnéticas y pueden requerir baterías, lo que añade un componente adicional de mantenimiento.

Para facilitar la comparación entre las diferentes tecnologías mencionadas, se ha elaborado la **Tabla III**, donde se resumen sus ventajas, limitaciones y costos asociados.

Tabla III. Comparación de tecnologías			
Sistema	Ventajas	Limitaciones	Costo
PLC	Alta robustez y personalización.	Costoso, sin conectividad remota, sin soluciones inalámbricas integradas.	Alto
SCADA	Supervisión en tiempo real, integración con múltiples sensores.	Costoso, implementación compleja, no optimizado para soluciones inalámbricas.	Alto
Termostatos programables	Económicos, fácil instalación.	Funcionalidad limitada, sin monitoreo remoto, sin ajuste dinámico.	Bajo
BMS	Control integral de grandes infraestructuras, gestión energética.	Sobredimensionado para cámaras pequeñas, alto costo.	Alto
Sistemas inalámbricos (WSN)	Flexibilidad de instalación, fácil integración con IoT y monitoreo remoto.	Interferencias electromagnéticas, requiere mantenimiento de baterías.	Moderado

El gráfico de la *Figura 3.1* a continuación ilustra la evolución en la adopción de diversas tecnologías de control ambiental en la industria a lo largo del tiempo, destacando el crecimiento sostenido de soluciones como PLC y SCADA, así como el reciente auge de las redes de sensores inalámbricos (WSN) y los sistemas de gestión de edificios (BMS), impulsados por la creciente digitalización y la conectividad del Internet de las Cosas (IoT). Mientras tanto, tecnologías más básicas, como los termostatos digitales, han visto una disminución en su adopción debido a la falta de capacidades avanzadas de monitoreo remoto y control en tiempo real.

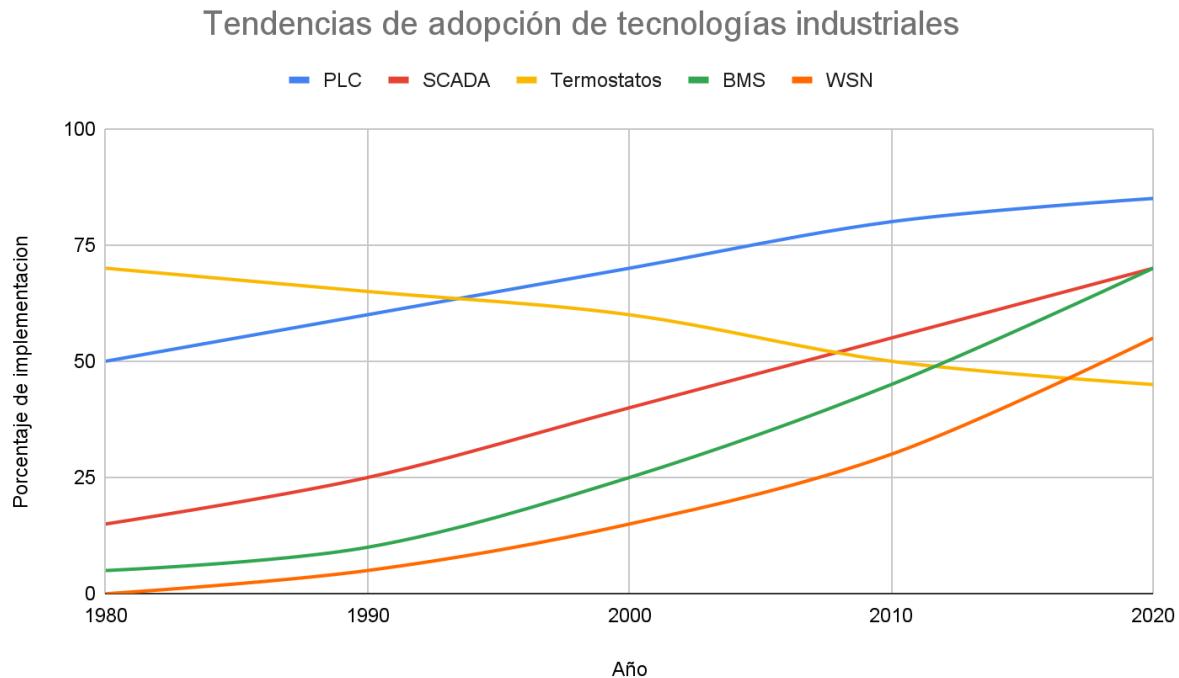


Figura 3.1 Tendencias de adopción de tecnologías industriales [3].

Empresas que brindan soluciones similares

Aquí algunos ejemplos de empresas que ofrecen soluciones comparables al SMCA:

- **Schneider Electric**: Su plataforma EcoStruxure ofrece soluciones de SCADA y BMS que permiten la gestión y control remoto en tiempo real de entornos industriales.
 - [EcoStruxure](#)
- **Siemens**: Ofrecen sistemas de control industrial como SIMATIC para PLC y SCADA, así como soluciones de monitoreo IoT.
 - [SIMATIC SCADA](#)
- **Honeywell**: Su sistema Experion combina SCADA, BMS, y monitoreo remoto.
 - [Honeywell Experion](#)
- **ABB**: Proveedores de soluciones PLC, SCADA, y redes de sensores inalámbricos avanzadas para monitoreo industrial.
 - [ABB Automation Solutions](#)

3.2 Marco teórico de la solución

El diseño del SMCA se sustenta en varios conceptos teóricos y tecnológicos clave:

- **Sistemas embebidos:** El SMCA utiliza microcontroladores programados en Lenguaje C con FreeRTOS. Un RTOS (Real-Time Operating System) es un sistema operativo en tiempo real que gestiona tareas de manera que se cumplan tiempos de ejecución específicos. Esto es crucial para aplicaciones donde las respuestas rápidas y predecibles son fundamentales, como en sistemas embebidos para control ambiental. Los sistemas embebidos integran funcionalidades específicas en el hardware para aplicaciones dedicadas, brindando alta eficiencia y confiabilidad, garantizando un control preciso en tiempo real de las variables ambientales. En la *Figura 3.2*, se presenta un diagrama que ilustra los componentes lógicos de un sistema embebido, mostrando cómo se organizan las distintas capas del sistema.

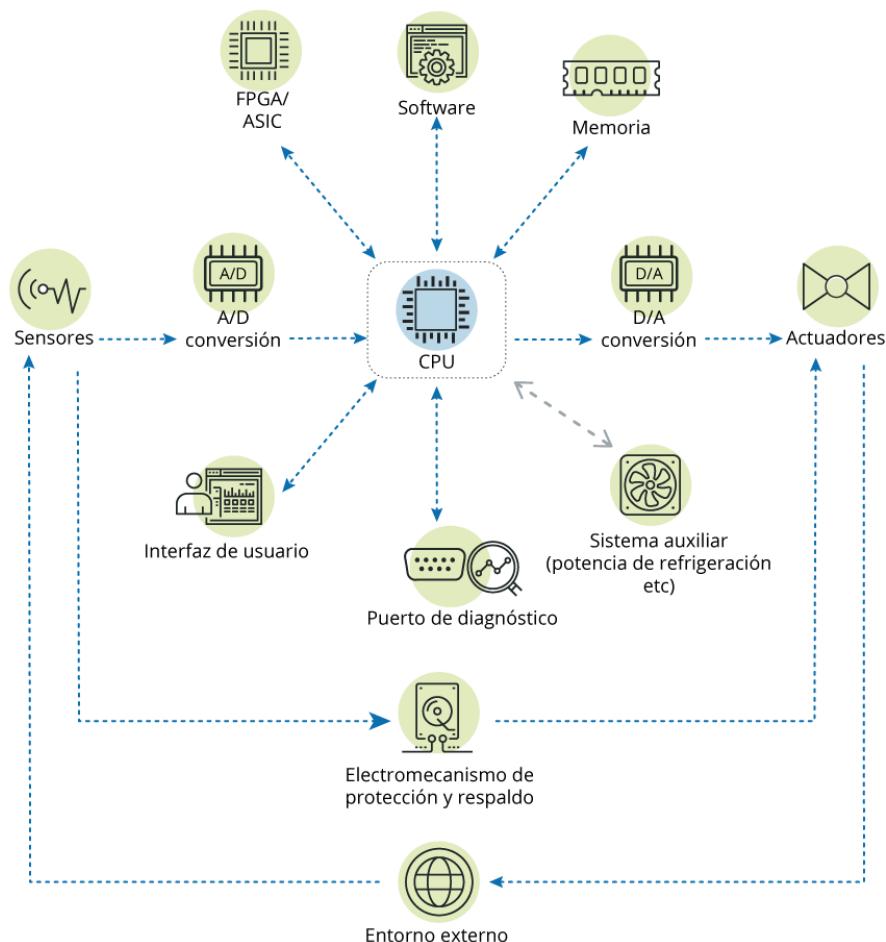


Figura 3.2 Componentes de un sistema embebido (nivel lógico) [4].

- **Sensado inalámbrico:** La medición de variables como temperatura y humedad se realiza mediante módulos de sensado inalámbricos. Estos módulos incluyen sensores que miden internamente las variables, y un microcontrolador dentro del módulo procesa los datos. La información recolectada se envía de forma inalámbrica (o, en algunos casos, de forma cableada) al módulo de control. Este enfoque elimina la necesidad de

cableado extenso, facilitando una instalación más flexible y menos invasiva, lo que optimiza el despliegue del sistema en diferentes entornos industriales.

- **Control centralizado:** Un módulo de control central recibe los datos de los módulos de sensado inalámbrico, los procesa y gestiona los actuadores para mantener condiciones ambientales óptimas. Este enfoque de control centralizado permite implementar estrategias de control avanzadas, como el control basado en retroalimentación o algoritmos predictivos, lo que mejora la respuesta ante cambios en las condiciones ambientales.
- **Interfaces Hombre-Máquina (HMI):** La interacción del usuario con el SMCA se realiza a través de una interfaz intuitiva, permitiendo el monitoreo y ajuste en tiempo real tanto de manera local como remota. Las HMI son esenciales para asegurar una operación eficiente y facilitar la gestión del sistema, mejorando la accesibilidad y reduciendo la complejidad operativa al mostrar datos clave de manera clara y visual.
- **Internet de las Cosas (IoT):** La conectividad a internet del SMCA permite el monitoreo remoto y el análisis de datos en tiempo real. Esta capacidad facilita una gestión más eficiente del sistema y la implementación de mejoras basadas en el análisis continuo de las condiciones ambientales. El uso del IoT también ofrece oportunidades para optimizar el rendimiento del sistema, anticipar posibles fallas mediante el análisis de datos históricos y mejorar la toma de decisiones basadas en información actualizada y en tiempo real.

3.3 Metodología implementada

La metodología para el diseño del SMCA se organiza en varias fases:

- **Fase de investigación y planificación:**
 - **Análisis del estado del arte:** Investigación de las tecnologías disponibles para sensado, control y comunicación, así como las soluciones existentes en el mercado. Se evalúan las similitudes, diferencias, ventajas y desventajas de estos sistemas en comparación con el SMCA.
 - **Análisis de necesidades:** Identificación de las necesidades y especificaciones de las cámaras frigoríficas seleccionadas para la implementación del SMCA.
- **Fase de diseño:**
 - **Diseño de hardware:** Desarrollo de los módulos de sensado y control, incluyendo la selección de sensores, microcontroladores y otros componentes electrónicos.
 - **Diseño de software:** Programación de los microcontroladores en lenguaje C utilizando FreeRTOS, desarrollo de la interfaz de usuario y configuración del sistema de comunicación inalámbrica. FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real (RTOS) que permite la ejecución eficiente de tareas críticas y de bajo consumo en sistemas embebidos.
- **Fase de prototipado:**

- **Construcción de prototipos:** Desarrollo de los módulos de sensado y control para validar la funcionalidad en entornos controlados.
- **Pruebas iniciales:** Validación del diseño y la funcionalidad de los módulos mediante pruebas iniciales en condiciones controladas.
- **Fase de implementación:**
 - **Instalación del sistema:** Implementación de los módulos en cámaras frigoríficas seleccionadas.
 - **Configuración y calibración:** Ajuste de los sensores y los módulos de control para asegurar precisión y eficiencia en la operación del SMCA.
- **Fase de pruebas y validación:**
 - **Pruebas unitarias e integración:** Evaluación individual de los componentes y verificación del funcionamiento conjunto del sistema en condiciones reales.
 - **Validación en campo:** Pruebas del sistema en cámaras frigoríficas reales, recopilación de datos y análisis de resultados obtenidos.
- **Fase de evaluación y ajuste:**
 - **Análisis de resultados:** Evaluación de la eficacia del SMCA en la conservación y maduración de productos bajo diferentes condiciones ambientales.
 - **Ajustes y optimización:** Realización de mejoras y ajustes necesarios basados en los resultados obtenidos durante la validación del sistema.
 - **Documentación y publicación:** Elaboración de informes técnicos detallados y documentación para el uso y mantenimiento del sistema.

3.4 Cronograma del Proyecto

El cronograma del **SMCA** detalla las fases clave del proyecto, desde el diseño inicial hasta la implementación y pruebas. El **diagrama de Gantt** a continuación resume las tareas y los tiempos estimados de cada etapa, asegurando un seguimiento preciso del avance y permitiendo ajustes en función de los resultados obtenidos durante la ejecución.

El **Diagrama de Gantt** presentado en la **Figura XX** detalla las actividades mencionadas anteriormente, con sus respectivas duraciones y dependencias. Este cronograma flexible permite realizar ajustes en función de la complejidad de cada tarea o de imprevistos que puedan surgir durante la implementación del sistema.

DIAGRAMA DE GANTT

TÍTULO DEL PROYECTO	Sistema Modular de Control Ambiental para Cámaras Frigoríficas	CLIENTE	UNER																						
RESPONSABLE DEL PROYECTO	Nahuel Medina	FECHA	06/05/24																						
FASE	DETALLES	T1								T2															
		MAY	6	13	20	27	3	10	17	24	8	15	22	29	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14
	SEMANA DEL PROYECTO: Analisis y Diseño	Fecha del primer lunes de cada mes -->																							
1		Identificación de requisitos																							
		Definición del alcance y de los objetivos																							
		Diseño de hardware y software																							
		Presupuesto																							
		Diagrama de contexto y gantt																							
		Diagrama de Gantt																							
2	Pruebas y Validacion	Pruebas unitarias de componentes																							
		Pruebas de integración del sistema																							
		Desarrollo de prototipos																							
		Validación y recopilación de datos																							
3	Implementacion	Integración del sistema en cámaras frigoríficas seleccionadas																							
		Configuración y calibración de sensores y módulos de control																							
		Desarrollo y prueba de la interfaz de usuario																							
4	Evaluacion y ajuste	Análisis de resultados																							
		Realización de ajustes y optimización del sistema																							
		Seguimiento de costes y esfuerzos																							
5	Cierre del proyecto	- Análisis final																							
		- Lista de mejoras																							
		- Documentacion y Presentacion																							

3.5 Generación de conceptos

Durante el desarrollo del SMCA, se generaron varios conceptos de diseño, evaluando distintos enfoques para el sensado, control y comunicación. Los conceptos fueron valorados en función de criterios como facilidad de implementación, flexibilidad, costos y eficiencia. En la **Tabla IV**, se presenta una comparación entre los distintos enfoques evaluados, destacando las principales ventajas y desventajas de cada opción.

Tabla IV. Comparación de enfoques de diseño evaluados para el SMCA				
Concepto	Ventajas	Desventajas	Costos	Flexibilidad
Sensado inalámbrico	Instalación más flexible y menos invasiva, reducción de cableado, posibilidad de expansión sencilla.	Requiere batería o alimentación externa para los módulos, puede haber interferencias en la señal.	Moderado (sensores y módulos de comunicación)	Alta
Sensado cableado	Mayor estabilidad en la transmisión de datos, sin interferencias.	Instalación más costosa y compleja debido al cableado físico, difícil expansión a nuevos sensores.	Bajo (sensores sin comunicación inalámbrica)	Baja
Control centralizado	Mejora en la gestión de actuadores, permite implementar algoritmos avanzados de control.	Un fallo en el módulo central afecta todo el sistema.	Moderado (requiere microcontrolador potente)	Moderada
Control distribuido	Reducción de la carga en un solo punto, mejora en la tolerancia a fallos, modularidad en cada zona.	Mayor complejidad en la programación y la comunicación entre módulos, más costoso de implementar.	Alto (más microcontroladores)	Alta
Comunicación inalámbrica	Fácil integración con el IoT, escalabilidad, sin necesidad de infraestructura cableada.	Potencial de interferencia y latencia, requiere medidas de seguridad adicionales.	Moderado (necesario invertir en infraestructura de comunicación)	Alta
Comunicación cableada	Transmisión más confiable y sin interferencias, mayor seguridad.	Costosa y difícil de instalar, menos flexible para modificaciones.	Bajo (sin necesidad de módulos inalámbricos)	Baja

3.6 Selección de concepto

El concepto seleccionado para el SMCA combina sensores inalámbricos, un módulo de control central y una interfaz de usuario intuitiva. Este enfoque fue elegido por varias razones:

- **Modularidad:** Permite agregar o eliminar módulos de sensado según las necesidades de la cámara frigorífica sin modificar la infraestructura existente.
- **Facilidad de integración:** Los sensores inalámbricos y el control central pueden integrarse fácilmente en cámaras frigoríficas ya existentes, reduciendo costos y tiempos de implementación.
- **Control en tiempo real:** El enfoque centralizado permite una gestión eficiente de las condiciones ambientales, ajustando variables críticas como temperatura y humedad en tiempo real.

La **Tabla III** respalda esta decisión, mostrando que el uso de sensores inalámbricos y control centralizado ofrece el mejor equilibrio entre flexibilidad, costos y eficiencia en comparación con otros enfoques evaluados.

3.7 Selección de materiales y dispositivos

La selección de materiales y dispositivos para el SMCA se llevó a cabo con base en criterios de **precisión, fiabilidad y costos**, además de ajustarse a los requerimientos específicos de las cámaras frigoríficas existentes. Los principales puntos considerados fueron:

- **Sensores inalámbricos de alta precisión:** Seleccionados en función de los rangos de temperatura y humedad a medir. En el caso de la cámara del **LIC**, se tuvo especial cuidado en elegir un sensor que ofreciera mayor precisión en el rango de humedad crítica que había presentado problemas.
- **Microcontroladores compatibles con FreeRTOS:** La selección del microcontrolador consideró tanto la cantidad de entradas y salidas necesarias para el control, como el número mínimo de pines requeridos. Además, se priorizó que el microcontrolador contara con periféricos como **I2C, SPI y UART** para la comunicación con los sensores y actuadores. También se tuvo en cuenta la inclusión de comunicación Wi-Fi, para que el SMCA no dependa de routers o sistemas externos para su conectividad.
- **Componentes electrónicos y módulos de comunicación:** En cuanto a los módulos de comunicación, se optó por tecnologías inalámbricas para la transmisión de datos entre los módulos de sensado y el módulo de control central. Para las etapas de potencia ON/OFF, se decidió utilizar relés, mientras que para la modulación de potencia, se diseñó un circuito específico adecuado para controlar las variaciones en la potencia.

Como el SMCA se implementa en cámaras frigoríficas ya existentes, no fue necesario seleccionar actuadores nuevos, ya que el sistema se adapta a los actuadores que las cámaras poseen actualmente.

3.8 Arquitectura del producto

La arquitectura del SMCA se compone de los siguientes elementos principales:

1. **Módulos de sensado inalámbrico:** Estos módulos están equipados con sensores para medir temperatura y humedad. La comunicación entre los módulos de sensado y el módulo de control se realiza de manera inalámbrica, lo que permite una instalación flexible y una operación descentralizada. Además, se pueden agregar nuevos módulos sin necesidad de modificar la infraestructura existente.
2. **Módulo de control central:** Este es el componente clave del SMCA. El módulo central procesa los datos recibidos de los sensores y toma decisiones para gestionar los actuadores (ya existentes en las cámaras frigoríficas). Está basado en un microcontrolador programado en C utilizando FreeRTOS, lo que permite gestionar tareas en tiempo real de manera eficiente. También incluye los periféricos necesarios para la comunicación con sensores y actuadores.
3. **Interfaz de usuario (HMI):** La interfaz de usuario permite monitorear y ajustar las condiciones ambientales en tiempo real. Es accesible tanto de manera local como de forma remota a través de una aplicación web o móvil, lo que facilita la gestión del sistema desde cualquier ubicación.

3.9 Diagrama de contexto del SMCA

A continuación se presenta el **Diagrama de contexto** que describe la relación entre los módulos del SMCA, los sensores, los actuadores y la interfaz de usuario (ver Figura 3.3).

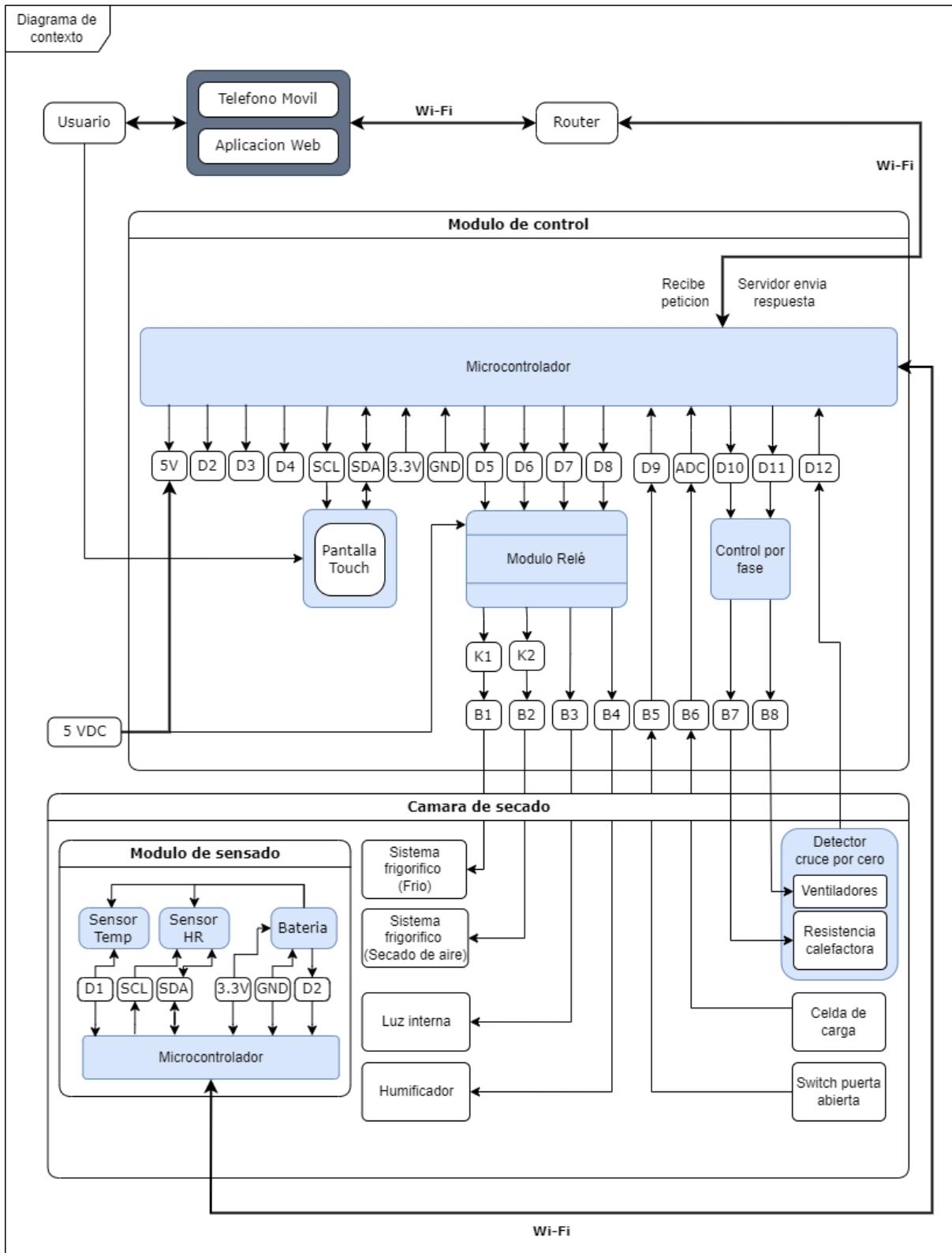


Figura 3.3 Diagrama de contexto del SMCA [5].

Capítulo 4 - Ingeniería del Proyecto

4.1 Introducción

La ingeniería del Sistema Modular de Control Ambiental (SMCA) se enfoca en desarrollar y detallar cada componente del sistema, asegurando su integración eficiente para el control ambiental en cámaras frigoríficas. Esta fase abarca la selección de hardware y software, la disposición física de los módulos y los procedimientos de instalación, todos orientados a garantizar el óptimo rendimiento del sistema. El objetivo es transformar el diseño conceptual del SMCA en una solución técnica precisa, capaz de controlar las condiciones ambientales de manera confiable, flexible y eficiente.

4.2 Selección de Componentes

Para garantizar la eficiencia y el correcto funcionamiento del SMCA, se llevó a cabo una exhaustiva evaluación de componentes considerando varios criterios. Estos incluyeron el costo, la eficiencia energética, la precisión, la disponibilidad, y la compatibilidad con los requerimientos del proyecto. Los componentes seleccionados deben cumplir con las exigencias de funcionamiento en un entorno industrial, así como garantizar un monitoreo preciso y un control robusto.

4.2.1 Microcontrolador ESP32

El ESP32 fue seleccionado por su capacidad nativa para integrar Wi-Fi y Bluetooth, así como su compatibilidad con FreeRTOS, lo que lo hace ideal para la aplicación en el SMCA. Este microcontrolador tiene un bajo consumo energético y una cantidad adecuada de pines GPIO, lo que lo convierte en una opción equilibrada para el control de sistemas embebidos.

A continuación, en la Tabla V se amplía la comparativa técnica de otros microcontroladores y computadoras de placa única (SBC), incluyendo más alternativas que podrían considerarse para aplicaciones similares al SMCA.

Tabla V Comparativa técnica ampliada de microcontroladores y SBC.				
Característica	ESP32	Raspberry Pi 5 (SBC)	STM32F411	BeagleBone Black (SBC)
Foto				
Arquitectura	Xtensa Dual-Core (LX6)	ARM Cortex-A76 (64-bit)	ARM Cortex-M4 (32-bit)	ARM Cortex-A8 (32-bit)

Frecuencia de reloj	160 - 240 MHz	1.8 GHz	100 MHz	1 GHz
Memoria RAM	520 KB	8 GB LPDDR4	128 KB SRAM	512 MB DDR3
Conectividad Wi-Fi	Sí (802.11 b/g/n)	Periférico adicional	No	Periférico adicional
Soporte FreeRTOS	Sí	Parcial (no optimizado)	Sí	Parcial
Consumo energético	Bajo (160 mA pico)	Alto (600-900 mA)	Bajo (50 mA)	Alto (500-700 mA)
GPIO	34 pines	28 pines	50 pines	65 pines
Modulos integrados	Wi-Fi, Bluetooth, ADC	HDMI, USB 3.0, Ethernet	ADC, UART, I2C, SPI	HDMI, USB, Ethernet

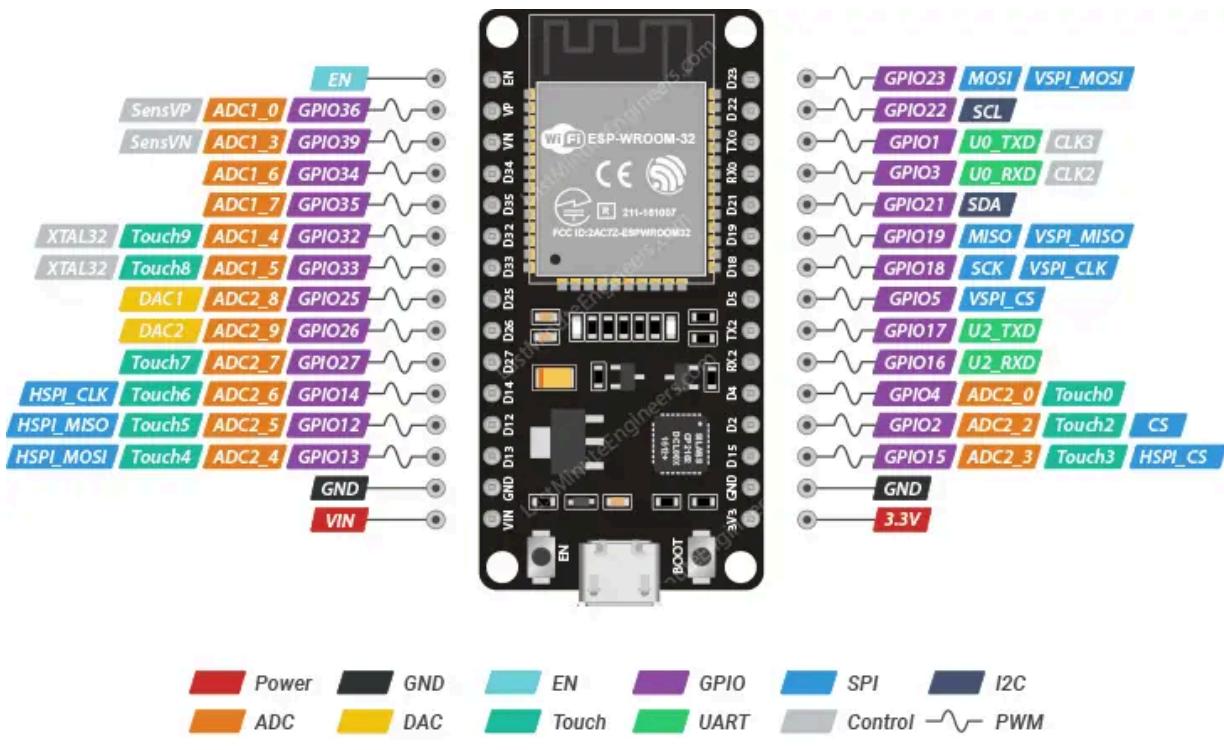
En la Tabla VI se presentan las ventajas y desventajas para las diferentes opciones evaluadas:

Tabla VI. Ventajas y desventajas de las opciones evaluadas.		
Dispositivo	Ventajas	Desventajas
ESP32	Wi-Fi y Bluetooth integrados, bajo consumo energético, soporte FreeRTOS, económico.	Capacidad de procesamiento limitada para aplicaciones intensivas en datos o IA.
Raspberry Pi 5 (SBC)	Gran capacidad de procesamiento, soporte para periféricos adicionales, comunidad activa.	Alto consumo energético, sobre especificado para aplicaciones embebidas simples, requiere módulos adicionales para Wi-Fi y FreeRTOS no optimizado.
STM32F411	Bajo consumo, buen rendimiento para aplicaciones embebidas, compatible con FreeRTOS.	No tiene Wi-Fi integrado, requiere más módulos adicionales, lo que aumenta la complejidad del diseño.
BeagleBone Black (SBC)	Potente para aplicaciones industriales, buen soporte para Linux, muchos pines GPIO y periféricos.	Alto consumo energético, más costoso y complejo de programar para aplicaciones que no necesitan tanta capacidad de procesamiento.

La selección del **ESP32** para el SMCA fue basada en varios factores técnicos clave:

- **Wi-Fi y Bluetooth nativos:** Esto elimina la necesidad de módulos adicionales, simplificando el diseño y reduciendo costos.
- **Eficiencia energética:** El ESP32 tiene un bajo consumo de energía, lo que es crucial para los módulos de sensado que operarán en modo de bajo consumo con batería.

- Soporte FreeRTOS:** Su compatibilidad nativa con FreeRTOS permite la programación eficiente de tareas en tiempo real, esenciales para la gestión de múltiples sensores y actuadores.
- Costo accesible:** En comparación con otras opciones como la Raspberry Pi o BeagleBone, el ESP32 es mucho más económico sin sacrificar las funcionalidades necesarias para el proyecto.



/ESP32 Dev. Board/ Pinout



Figura 4.1 ESP32 utilizado en el prototipo SMCA [6].

4.2.2 Sensores de Temperatura y Humedad

A continuación se presentan dos tablas comparativas para los sensores de temperatura y de humedad más relevantes, en función de los criterios de selección, como el costo, la eficiencia energética, la precisión, la disponibilidad y la compatibilidad con el proyecto SMCA.

Tabla VII. Comparativa de sensores de temperatura				
Característica	DS18B20	LM35	DHT11	SHT21
Tipo	Digital	Analógico	Digital	Digital

Rango de Temperatura	-55°C a +125°C	-55°C a +150°C	0°C a +50°C	-40°C a +125°C
Precisión	±0.5°C (en -10°C a 85°C)	±1°C (en todo el rango)	±2°C	±0.3°C
Resolución	12 bits	No aplicable (analógico)	8 bits	14 bits
Interfaz	1-Wire	Voltaje de salida	1-Wire	I2C
Costo	\$2-4 USD	\$2-3 USD	\$1-2 USD	\$5-6 USD
Eficiencia Energética	Bajo consumo (1.5 mA en modo activo)	Bajo consumo (60 µA en modo activo)	Medio (0.3-0.5 mA en modo activo)	Bajo consumo (3 µA en modo sleep, 150 µA en activo)

Tabla VIII. Comparativa de sensores de humedad

Característica	AM2320	DHT22	SHT21	DHT11
Rango de Humedad	0-100% HR	0-100% HR	0-100% HR	20-90% HR
Precisión de Humedad	±2% HR (en 10-90%)	±2-5% HR	±2% HR	±5% HR
Rango de Temperatura	-40°C a +80°C	-40°C a +80°C	-40°C a +125°C	0°C a +50°C
Interfaz	I2C	1-Wire	I2C	1-Wire
Costo	\$3-5 USD	\$5-6 USD	\$5-6 USD	\$1-2 USD
Eficiencia Energética	Bajo consumo (50 µA en modo sleep, 1 mA en activo)	Medio (1.5 mA en modo activo)	Bajo consumo (3 µA en modo sleep, 150 µA en activo)	Medio (0.3-0.5 mA en activo)

Justificación de la Selección

- **DS18B20:** fue elegido sobre el LM35, DHT11 y SHT21 debido a su mejor precisión y capacidad para operar en rangos de temperatura muy bajos, lo cual es crucial para el control ambiental en las cámaras frigoríficas del SMCA. Aunque tanto el DHT11 como el SHT21 son también sensores de humedad, es importante considerarlos como posibles sensores de temperatura. Sin embargo, el DS18B20 destaca principalmente por su interfaz sencilla 1-Wire, que reduce la complejidad del sistema y minimiza el número de pines necesarios. Además, ofrece un equilibrio superior entre costo y precisión, lo que lo convierte en una opción más económica y eficiente para esta aplicación en comparación con las otras alternativas evaluadas.

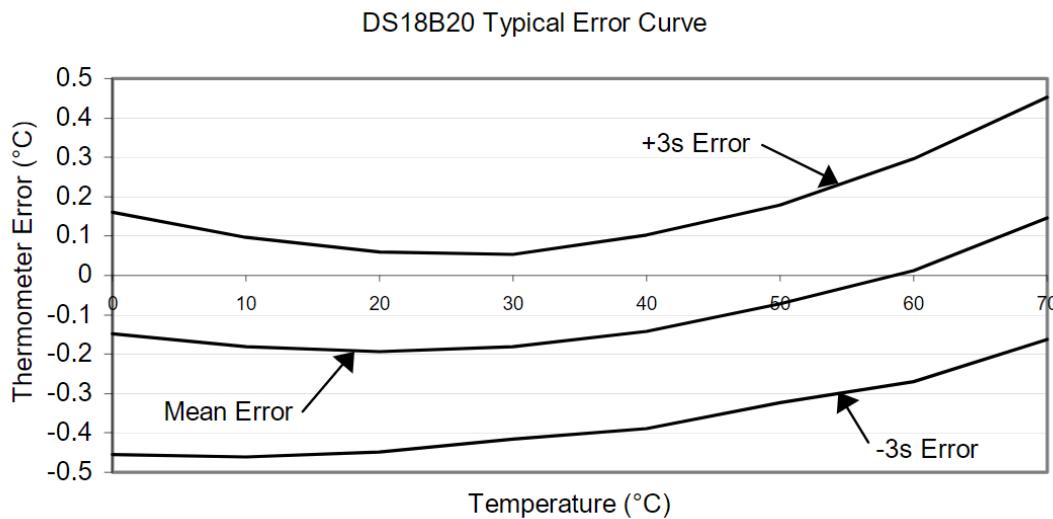


Figura 4.1. Gráfico de precisión del sensor **DS18B20** en diferentes rangos de temperatura [Fuente: Datasheet del DS18B20].

- **AM2320:** Se seleccionó como sensor principal de humedad debido a su gran precisión en el rango crítico de 85-90% HR, donde se presentó el mayor desafío en el sistema del LIC. Si bien el DHT22 tiene una precisión similar, su menor durabilidad en entornos industriales y mayor consumo energético lo hicieron menos ideal para esta aplicación. El SHT21, aunque también es una excelente opción, fue descartado por su costo más elevado, sin ofrecer una mejora significativa en el rendimiento.

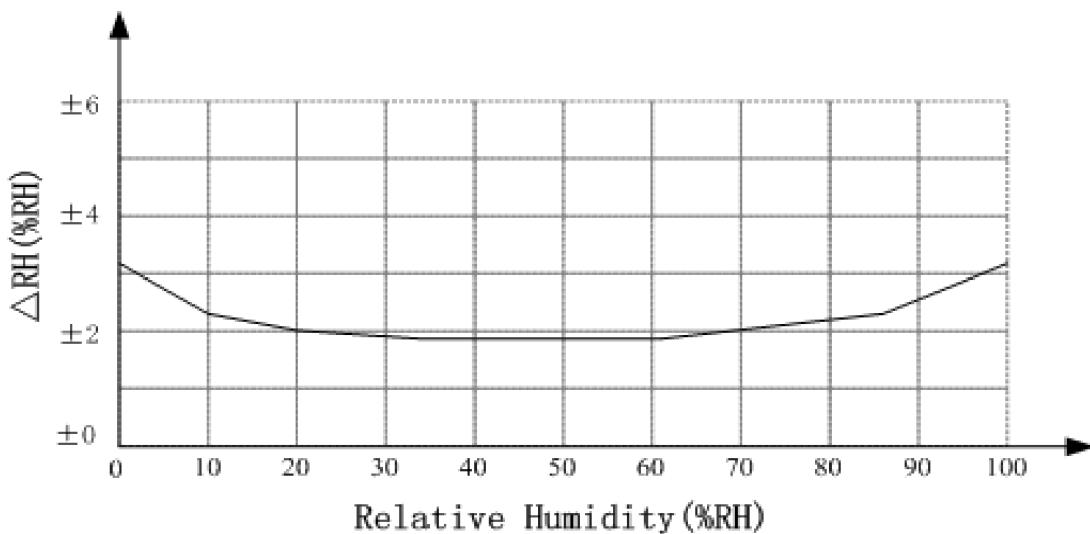


Figura 4.2. Curva de error del sensor de **humedad AM2320** en rangos críticos (85%-90%) [Fuente: Datasheet del AM2320].

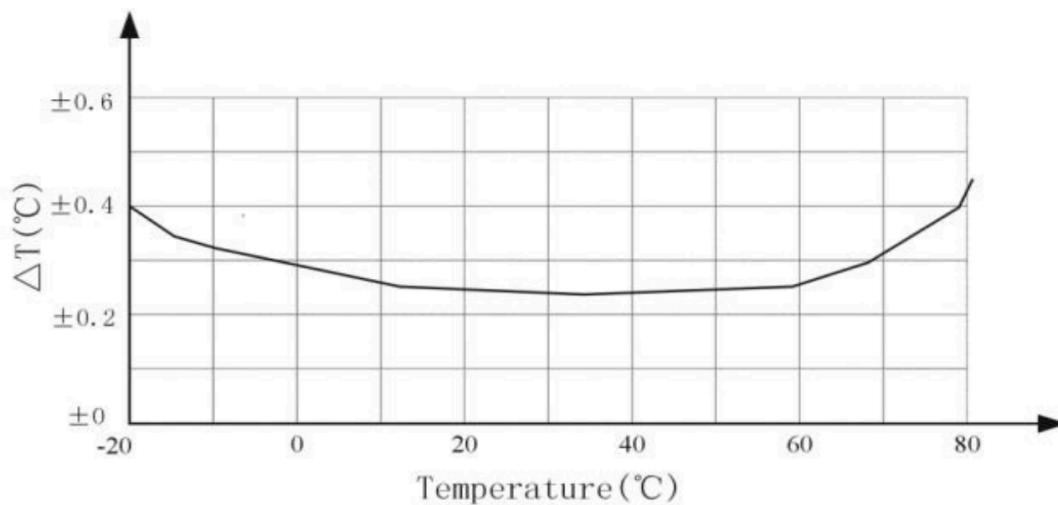


Figura 4.3. Curva de error del sensor de **temperatura AM2320** en rangos críticos [Fuente: Datasheet del AM2320].

Redundancia en la Medición de Temperatura

En el SMCA, la redundancia en la medición de la temperatura se justifica para garantizar la máxima fiabilidad en condiciones críticas, como las que se encuentran en cámaras frigoríficas. La implementación de dos sensores, el DS18B20 y el AM2320, permite que el sistema disponga de un respaldo en caso de fallo de uno de los sensores. Además, esta configuración posibilita la verificación cruzada de los datos, lo que incrementa la precisión y seguridad en la medición, asegurando que el sistema mantenga las condiciones ambientales óptimas sin interrupciones.

4.2.3 Control de Potencia ON/OFF

Para el control de los actuadores del SMCA, se eligieron módulos de **5 relés**, cada uno con una capacidad de hasta **2500W** en corriente alterna (AC) y **300W** en corriente continua (DC). Estos relés desempeñan un papel crucial en la activación de los sistemas principales de la cámara frigorífica, asegurando un funcionamiento confiable y seguro bajo las exigencias de potencia.

Tabla VIII. Dispositivos Controlados por Relés					
Relé	Dispositivo Controlado	Potencia (W)	Corriente (A)	Voltaje Operativo	Función
Relé 1	Iluminación	15	0,07	220VAC	Control ON/OFF de la iluminación interna.
Relé 2	Sistema de Enfriamiento	500	2,27	220VAC	Activación del sistema de enfriamiento.
Relé 3	Sistema de Secado de Aire	500	2,27	220VAC	Activación del sistema de secado de aire.
Relé 4	Humidificador	150	0,68	220VAC	Control del nivel de humedad.
Relé 5	Recambio de Aire	1,5	0,13	12VDC	Sistema de control de recirculación de aire.

Justificación Técnica:

Los relés son una solución económica y confiable para el control ON/OFF de actuadores de baja a media potencia. Ofrecen una excelente versatilidad para manejar tanto cargas de corriente alterna como continua.

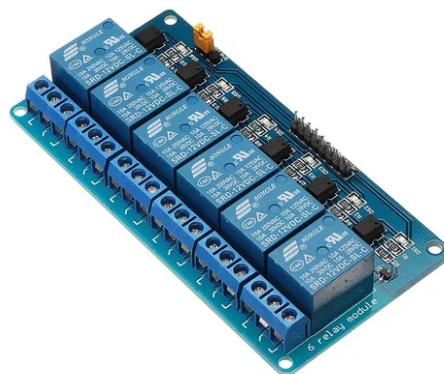


Figura 4.4. Módulo de 6 relés utilizado para el control de dispositivos del SMCA [Fuente: ???].

En cuanto a futuras optimizaciones, relés de estado sólido (SSR) y contactores también podrían evaluarse para aplicaciones que requieran conmutación más rápida o mayor durabilidad. Por ejemplo, los relés de estado sólido que montan directamente sobre riel DIN y funcionan a 24VDC, una tensión de control estándar en la industria, son una alternativa para entornos más exigentes donde se manejan mayores cargas y se busca una mayor vida útil.

4.2.4 Módulo de Control de Potencia Modulada

Criterios de Selección:

Para el control de la potencia modulada en el SMCA, se seleccionaron componentes cuidadosamente evaluados según los siguientes criterios:

- **TRIAC BT137-600:** Se eligió este TRIAC para el control de los motores del sistema debido a su capacidad para manejar corrientes de hasta 8 A en corriente alterna (AC). Este valor es más que suficiente para los motores utilizados en la cámara frigorífica, ya que la corriente consumida por estos motores no supera este límite. Este TRIAC es adecuado para manejar aplicaciones de baja a media potencia, como ventiladores y motores en la cámara frigorífica.
- **TRIAC BT138-600:** Este TRIAC se seleccionó específicamente para el control de la resistencia calefactora de 2 kW debido a su capacidad de manejar corrientes de hasta 12 A en AC. Su mayor capacidad de corriente lo hace ideal para aplicaciones de mayor demanda, como el control de la potencia de la resistencia calefactora, garantizando una operación estable sin sobrecargar los componentes.
- **Optoacoplador TLP620:** Este componente asegura una sincronización precisa entre el ciclo de la corriente alterna y el disparo del TRIAC. Al detectar el momento en que la señal de AC cruza por cero voltios, se reduce la posibilidad de generar armónicos o

picos de corriente, optimizando el control de fase del TRIAC y reduciendo la interferencia electromagnética (EMI).

- **Optoacoplador MOC3021:** Proporciona un aislamiento galvánico entre el circuito de control y el de potencia. Esto asegura que cualquier interferencia o falla en el circuito de potencia no afecte al microcontrolador ESP32 o a los demás componentes de control. Este optoacoplador es capaz de disparar directamente el TRIAC, simplificando el diseño del circuito de control de potencia.

Tabla IX. Resumen de Componentes del Módulo de Control de Potencia Modulada			
Componente	Foto	Función	Capacidad
TRIAC BT137-600		Control de potencia de motores para el manejo de la velocidad del aire	Hasta 8 A, 600 V
TRIAC BT138-600		Control de resistencia calefactora de 2kW	Hasta 12 A, 600 V
Optoacoplador MOC3021M		Aislamiento galvánico y disparo de TRIAC	Tensión de aislamiento: 5000 Vrms
Optoacoplador TLP620		Detector de Cruce, sincronización de fase con la señal AC	Tensión de aislamiento: 5000 Vrms

4.2.5 Conectores

La sección de conectores para el SMCA ha sido diseñada para garantizar robustez y facilidad de ensamblaje, tanto en señales de control como en conexiones de potencia.

Conectores JST:

- **Uso:** Se utilizan para conectar los módulos de sensado y control.
- **Ventajas:** Tamaño compacto, fácil ensamblaje, y buena resistencia a vibraciones.
- **Aplicación:** Conexión de sensores de temperatura y humedad al microcontrolador ESP32, así como para señales de control hacia los controladores de potencia.



Figura 4.1 Conector JST utilizado en el SMCA

Borneras enchufables:

- **Uso:** Se emplean para las conexiones de alta potencia en los actuadores.
- **Ventajas:** Soportan hasta 10 A, simplifican la instalación, y proporcionan conexiones seguras para cargas de hasta 250V AC.
- **Aplicación:** Conexiones de los sistemas control de velocidad de aire, y resistencia calorífica.



Figura 4.2 Borneras Enchufables utilizadas en el módulo de potencia

4.2.6 Batería

La selección y el dimensionamiento adecuado de la batería son cruciales para garantizar el funcionamiento autónomo y eficiente del módulo de sensado inalámbrico del SMCA. En esta sección se presenta una evaluación detallada del consumo energético del sistema, considerando todos los factores que pueden influir en la autonomía de la batería, incluyendo las corrientes de fuga, condiciones ambientales y consumos adicionales de los componentes.

Tipo de Batería Seleccionada

Batería de Ion de Litio (Li-ion) de 3.7 V y 4200 mAh

Características Principales:

- **Tipo:** Batería recargable de Ion de Litio (Li-ion)
- **Voltaje Nominal:** 3.7 V (voltaje máximo de 4.2 V y mínimo de 3.0 V)
- **Capacidad Nominal:** 4200 mAh
- **Corriente de Descarga Máxima Continua:** 2C (aproximadamente 8.4 A)
- **Temperatura de Operación:** -20°C a +60°C
- **Ciclo de Vida:** Más de 500 ciclos de carga-descarga
- **Dimensiones Aproximadas:** 65 mm x 18 mm x 18 mm
- **Peso Aproximado:** 45 gramos

Compatibilidad de Voltaje:

El **ESP32** y los sensores asociados operan a un voltaje de 3.3 V. La batería seleccionada de 3.7 V es adecuada, permitiendo implementar un circuito de alimentación que suministra el voltaje necesario sin necesidad de reguladores de voltaje lineales que introduzcan pérdidas significativas.

Diseño del Circuito de Alimentación:

- **Diodo Schottky de 1 A:** Se utiliza un diodo Schottky en serie con la salida de la batería, con una caída de voltaje aproximada de **0.3 V**, reduciendo el voltaje de entrada al ESP32 a aproximadamente **3.4 V** cuando la batería está completamente cargada.
- **Condensador de 47 µF:** Se agrega un condensador electrolítico de 47 µF en paralelo con la alimentación para estabilizar el voltaje durante los picos de consumo, especialmente durante las transmisiones Wi-Fi.

Ventajas de este Diseño:

- **Eficiencia Energética:** Al evitar reguladores lineales, se minimizan las pérdidas por disipación de calor.
- **Simplicidad del Circuito:** Menor complejidad y componentes.
- **Compatibilidad de Voltaje:** Mantiene el voltaje dentro del rango operativo del ESP32 y los sensores.

Consideraciones sobre el Consumo:

Cada componente energizado en el circuito contribuye al consumo total del sistema. Es importante considerar el consumo de todos los componentes, incluyendo aquellos que puedan tener consumos mínimos o estar en modo de bajo consumo.

Sistema de Carga y Monitoreo

Circuito de Carga:

- **Controlador TP4056:** Se utiliza un controlador de carga TP4056 para la batería Li-ion, permitiendo una carga segura a través de un puerto USB-C. Este circuito incluye protecciones contra sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito.
- **Consumo del Circuito de Carga:** Aun cuando no está en proceso de carga, el circuito del TP4056 y los componentes asociados consumen corriente. Este consumo debe ser incluido en el cálculo total de consumo del sistema.

Monitoreo del Nivel de Batería:

- **Divisor de Voltaje:** Se utiliza un divisor de voltaje para reducir el voltaje de la batería al nivel adecuado para el ADC del ESP32. El divisor de voltaje, sin embargo, consume corriente de forma continua.
- **Lectura del Voltaje de Batería:** El ESP32 realiza mediciones periódicas del voltaje de la batería para estimar el nivel de carga restante.

Evaluación del Consumo Energético

Tabla XII. Consumo de componentes en modo activo		
Componente	Modo / Estado	Consumo (mA)
ESP32	Transmisión Wi-Fi (pico)	400
	Operación General (promedio)	240
DS18B20	Medición	1.5
AM2320	Medición	1

Consumo del Divisor de Voltaje:

- **Resistencias de 100 kΩ y 33 kΩ:**

$$I_{\text{divisor}} = \frac{V_{\text{batería}}}{R_{\text{total}}} = \frac{3.7 \text{ V}}{133 \text{ k}\Omega} \approx 27.8 \mu\text{A}$$

Consumo del Circuito de Carga (TP4056):

- **Consumo en Reposo:** Aproximadamente **50 μA** cuando no está cargando.

Corrientes de Fuga y Consumos Adicionales:

- **Corrientes de Fuga en la PCB:** Considerando condiciones de humedad, se puede estimar una corriente de fuga de **5 μA**.
- **Otros Componentes Pasivos:** Consumo estimado de **10 μA**.

Total Consumo en Modo Activo I_{activo} :

$$I_{\text{activo}} = 240 \text{ mA}(ESP32S) + 1.5 \text{ mA}(DS18B20) + 1 \text{ mA}(AM2320)$$

$$+0.0278 \text{ mA}(Divisor) + 0.05 \text{ mA}(TP4056) + 0.005 \text{ mA}(Fuga \text{ PCB})$$

$$+0.01 \text{ mA}(Pasivos) \approx 242.59 \text{ mA}$$

Tabla XI. Consumo de componentes en modo Deep Sleep		
Componente	Modo / Estado	Consumo (μA)
ESP32	Deep Sleep	22
DS18B20	Reposo	1
AM2320	Reposo	5
Divisor de Voltaje	Continuo	27.8
Circuito de Carga (TP4056)	Reposo	50
Corrientes de Fuga en la PCB	-	5
Otros Componentes Pasivos	-	10

Total Consumo en Modo Deep Sleep I_{deep} :

$$I_{\text{deep}} = 0.022 \text{ mA}(ESP32S) + 0.001 \text{ mA}(DS18B20) + 0.005 \text{ mA}(AM2320)$$

$$+0.0278 \text{ mA}(Divisor) + 0.05 \text{ mA}(TP4056) + 0.005 \text{ mA}(Fuga \text{ PCB})$$

$$+0.01 \text{ mA}(Pasivos) \approx 0.1208 \text{ mA}$$

El consumo energético total del sistema se puede calcular integrando el consumo de corriente en función del tiempo para los diferentes modos de operación.

Consumo en Modo Activo Q_{activo} :

$$Q_{\text{activo}} = \int_0^{t_{\text{activo}}} I_{\text{activo}} dt = I_{\text{activo}} \times t_{\text{activo}}$$

Consumo en Modo Deep Sleep Q_{deep} :

$$Q_{\text{deep}} = \int_0^{t_{\text{deep}}} I_{\text{deep}} dt = I_{\text{deep}} \times t_{\text{deep}}$$

Parámetros de Tiempo:

- **Tiempo en Modo Activo por Ciclo** $t_{\text{activo_ciclo}}$: 5 segundos
- **Número de Mediciones por Día** $n_{\text{mediciones}}$: 288 (cada 5 minutos)

- **Tiempo Total en Modo Activo por Día** t_{activo} :
 $t_{\text{activo}} = t_{\text{activo_ciclo}} \times n_{\text{mediciones}} = 5 \text{ s} \times 288 = 1440 \text{ s} = 0.4 \text{ h}$
- **Tiempo en Modo Deep Sleep por Día** t_{deep} :
 $t_{\text{deep}} = 24 \text{ h} - t_{\text{activo}} = 23.6 \text{ h}$

Cálculo de Consumos:

1. **Consumo en Modo Activo:**

$$Q_{\text{activo}} = 242.59 \text{ mA} \times 0.4 \text{ h} = 97.036 \text{ mAh/dia}$$

2. **Consumo en Modo Deep Sleep:**

$$Q_{\text{deep}} = 0.1208 \text{ mA} \times 23.6 \text{ h} = 2.855 \text{ mAh/dia}$$

3. **Consumo Total Diario** Q_{total} :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{activo}} + Q_{\text{deep}} = 97.036 \text{ mAh} + 2.855 \text{ mAh} = 99.891 \text{ mAh/dia}$$

Autonomía Estimada de la Batería

Considerando el consumo total diario calculado, la autonomía de la batería se estima como:

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad de la Bateria}}{Q_{\text{total}}} = \frac{4200 \text{ mAh}}{99.891 \text{ mAh/dia}} \approx 42.05 \text{ dias}$$

Efecto de la Humedad:

- La alta humedad dentro de las cámaras frigoríficas puede aumentar las corrientes de fuga en la PCB y afectar el rendimiento de los componentes.
- Se estima que las corrientes de fuga pueden incrementarse hasta un **50%** en condiciones de humedad extrema.

Consumo Adicional por Humedad:

- Corrientes de fuga incrementadas: **5 μA** adicionales.

- **Consumo total en Deep Sleep con humedad elevada** $I_{\text{deep_humedad}}$:

$$I_{\text{deep_humedad}} = I_{\text{deep}} + 0.005 \text{ mA} = 0.1258 \text{ mA}$$

- **Consumo en Modo Deep Sleep con humedad elevada** $Q_{\text{deep_humedad}}$:

$$Q_{\text{deep_humedad}} = 0.1258 \text{ mA} \times 23.6 \text{ h} = 2.971 \text{ mAh/dia}$$

- **Nuevo Consumo Total Diario** $Q_{\text{total_humedad}}$:

$$Q_{\text{total_humedad}} = Q_{\text{activo}} + Q_{\text{deep_humedad}} = 97.036 \text{ mAh} + 2.971 \text{ mAh} = 100.007 \text{ mAh/dia}$$

- **Autonomía con Humedad Elevada:**

$$\text{Autonomía}_{\text{humedad}} = \frac{4200 \text{ mAh}}{100.007 \text{ mAh/dia}} \approx 41.99 \text{ dias}$$

Consideraciones sobre la Temperatura:

- A bajas temperaturas, la capacidad efectiva de la batería puede disminuir hasta un **20%**.

Capacidad Ajustada:

$$\text{Capacidad Ajustada} = 4200 \text{ mAh} \times 0.8 = 3360 \text{ mAh}$$

Autonomía Ajustada por Temperatura:

$$\text{Autonomía}_{\text{temp}} = \frac{3360 \text{ mAh}}{100.007 \text{ mAh/dia}} \approx 33.59 \text{ dias}$$

Curvas de Carga y Descarga de la Batería

Análisis de la Curva de Descarga:

- Las baterías Li-ion presentan una curva de descarga donde el voltaje disminuye de manera gradual hasta llegar al **20%** de la capacidad, a partir de la cual la caída de voltaje es más pronunciada.
- Es esencial asegurar que el voltaje de la batería, considerando la caída en el diodo Schottky, no caiga por debajo del voltaje mínimo de operación del ESP32 (3.0 V).

Implicaciones para el Sistema:

- **Voltaje Operativo Mínimo:** Si el voltaje cae por debajo de **3.0 V**, el sistema puede experimentar fallos o apagarse.
- **Planificación de Reemplazo o Recarga:** Se debe programar el reemplazo o recarga de la batería antes de que alcance el **20%** de su capacidad, considerando el efecto de la temperatura y otros factores.

Consideraciones Adicionales

Consumo del Circuito de Carga (TP4056):

- A pesar de no estar cargando, el circuito consume aproximadamente **50 µA**, contribuyendo al consumo total en ambos modos de operación.

Corrientes de Fuga en la PCB:

- Las condiciones de alta humedad pueden incrementar las corrientes de fuga, afectando la autonomía.
- Es importante considerar materiales y diseños de PCB que minimicen este efecto, como recubrimientos conformales y aislamientos adecuados.

Componentes Pasivos:

- Resistencias, capacitores y otros componentes pasivos consumen corriente, aunque sea mínima, y deben ser considerados en el cálculo total.

Cada Componente Cuenta:

- En el escenario actual, sin aplicar estrategias de optimización, cada componente energizado añade consumo al sistema.
- Es fundamental realizar un análisis exhaustivo de todos los consumos para obtener un panorama realista.

Análisis

El análisis detallado del consumo energético del módulo de sensado, considerando el peor caso y todos los factores que pueden influir, indica una autonomía estimada de aproximadamente **42 días** en condiciones ideales. Sin embargo, al considerar los efectos de bajas temperaturas y alta humedad, la autonomía puede reducirse a alrededor de **33.6 días**.

Este panorama realista del consumo del sistema actual resalta la importancia de considerar todos los consumos, incluso los mínimos, y las condiciones ambientales en el diseño y planificación del sistema. Para asegurar el funcionamiento continuo del módulo de sensado, es necesario programar el mantenimiento y recarga de la batería en función de estas estimaciones y monitorear constantemente el estado de la batería.

Prototipo

El uso del **ESP32 Dev Kit** en el prototipo del módulo de sensado del SMCA tiene un impacto considerable en la duración de la batería debido a los consumos adicionales de componentes que no son esenciales en el diseño final. Estos componentes incluyen **reguladores de voltaje lineales**, el **convertidor USB-UART** y los **LEDs indicadores**, que incrementan el consumo en modo activo y, especialmente, en modo **Deep Sleep**.

En comparación con el diseño optimizado, que estimaba una autonomía de **42 días**, el uso del Dev Kit reduce esta autonomía en aproximadamente un **64%**, bajando la duración de la batería a **15 días** en condiciones ideales. Esta reducción se debe principalmente a un incremento del consumo en modo **Deep Sleep**, donde el Dev Kit consume alrededor de **6.5 mA**, frente a los **22 µA** esperados con una configuración optimizada del ESP32.

Nota: Los cálculos presentados son aproximaciones basadas en estimaciones de consumo y pueden variar en la práctica. Se recomienda realizar mediciones empíricas del consumo en condiciones reales de operación para ajustar las estimaciones y asegurar la confiabilidad del sistema.

Mediciones de validación realizadas en el laboratorio

Pendiente.

4.3 Desarrollo de los Módulos

4.3.1 Módulo de Sensado

El **módulo de sensado** del SMCA es una pieza clave para el monitoreo preciso de las condiciones ambientales en cámaras frigoríficas. Su diseño modular permite una escalabilidad sencilla para ajustarse a diferentes tamaños y configuraciones de cámaras, manteniendo una medición confiable de **temperatura y humedad**. A continuación, se describe su estructura y funcionalidad con correcciones basadas en las aclaraciones anteriores.

Figura del modulo de sensado completo con su carcasa y anclaje

Figura módulo de sensado terminado

Descripción General del Módulo

El **ESP32** es el microcontrolador central del módulo de sensado, encargado de gestionar los sensores **DS18B20** (temperatura) y **AM2320** (temperatura y humedad). Además de su versatilidad y bajo consumo, el ESP32 integra Wi-Fi y es compatible con **FreeRTOS**, lo que permite una eficiente gestión de tareas en tiempo real y la transmisión de datos al módulo de control.

Este módulo está diseñado para operar en **modo de bajo consumo**, activando el ESP32 solo cuando es necesario realizar mediciones, lo que maximiza la duración de la batería. La arquitectura modular del diseño permite que los componentes esenciales (como los sensores) se instalen en la PCB compartida del SMCA.

Tabla X Resumen de Especificaciones del Módulo de Sensado	
Parámetro	Especificación
Microcontrolador	ESP32
Sensores	DS18B20 (temperatura), AM2320 (temperatura y humedad)
Batería	Li-ion 3.7 V, 4200 mAh
Consumo en Modo Activo	~200 mA (ajustado por eficiencia)
Consumo en Deep Sleep	~22 µA (ajustado por eficiencia)
Frecuencia de Medición	Cada 5 minutos
Autonomía Estimada	~16 días
Comunicación	Wi-Fi (802.11 b/g/n)
Protección Ambiental	Recubrimiento conformal, carcasa IP65
Dimensiones de la PCB	90 mm x 70 mm

Prueba de Funcionamiento del Módulo de Sensado

La figura 4.5 muestra el prototipo del módulo de sensado del SMCA. En este prototipo, se utiliza un ESP32 conectado a los sensores DS18B20 y AM2320 para medir temperatura y humedad, respectivamente. El sistema es alimentado por una batería Li-ion de 3.7V, la cual se recarga a través del módulo de carga TP4056.

Este montaje se diseñó para validar la funcionalidad de los sensores y la autonomía del sistema. El ESP32, en modo Deep Sleep, se activa en intervalos regulares para obtener las mediciones de los sensores, optimizando el consumo energético del sistema. La prueba busca confirmar la transmisión correcta de los datos mediante Wi-Fi y evaluar la eficiencia energética del sistema en función de la batería.

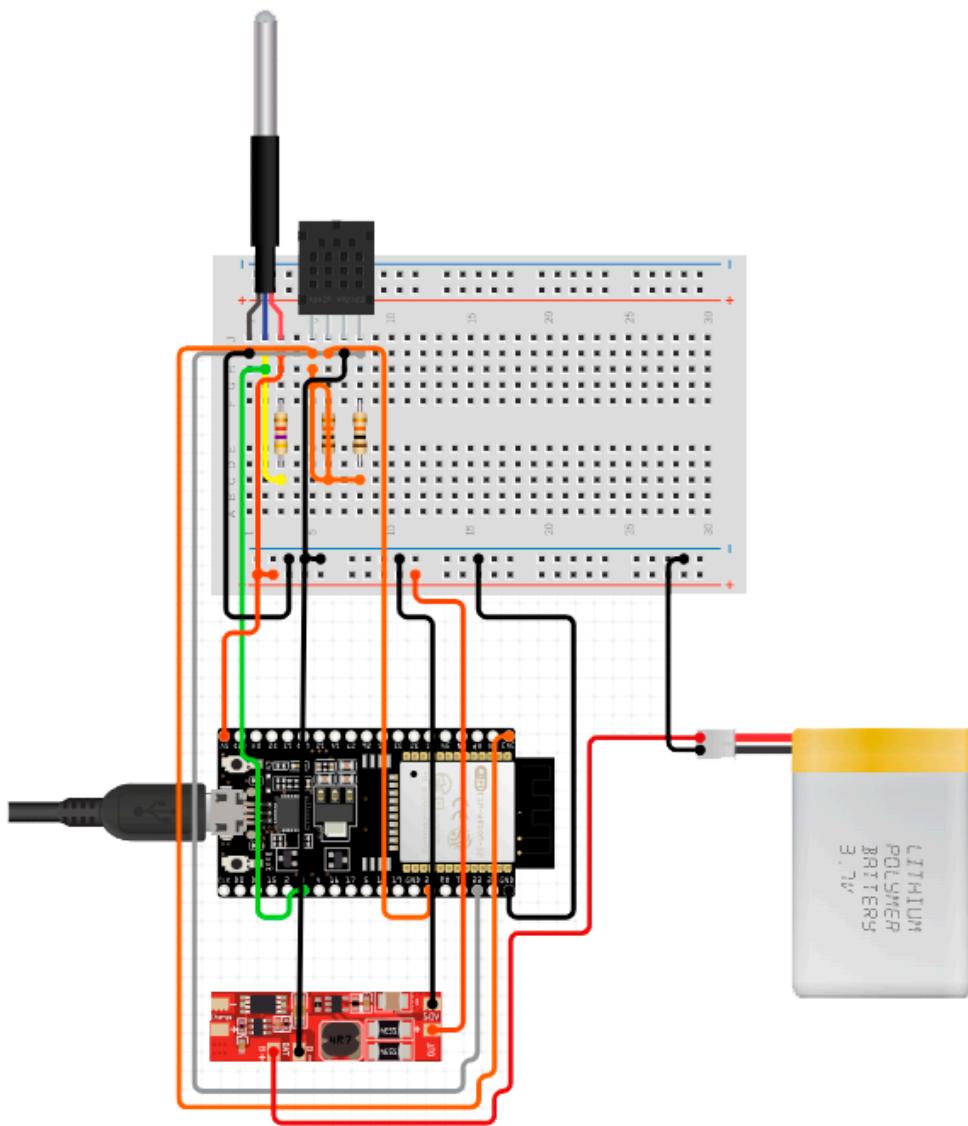


Figura 4.5: Prototipo del módulo de sensado con ESP32, sensores DS18B20 y AM2320, y batería Li-ion de 3.7V [Fuente: Elaboración propia].

Distribución de Módulos de Sensado en la Cámara Frigorífica

Para asegurar un monitoreo preciso y uniforme, la distribución adecuada de los módulos dentro de la cámara frigorífica es fundamental. Factores como la estratificación térmica, el flujo de aire y la distribución de productos pueden afectar las mediciones, por lo que se deben tener en cuenta al determinar la ubicación óptima de los sensores.

1. Factores a Considerar:

- **Flujo de aire** y ubicación de los sistemas de refrigeración: Los módulos deben colocarse a una distancia prudente de las salidas de aire frío para evitar lecturas distorsionadas.
- **Distribución de la carga:** Las áreas donde se almacenan productos pueden afectar el flujo de aire, lo que crea zonas de temperatura no uniforme.
- **Zonas críticas:** Cerca de las puertas o zonas de acceso, donde las fluctuaciones de temperatura pueden ser más pronunciadas, se deben colocar módulos adicionales.

2. Cálculo de la Cantidad de Módulos:

- Basado en pruebas previas y estudios térmicos, un módulo de sensado puede monitorear eficientemente un volumen de 10 m^3 , lo que equivale a un sensor cada 2 metros lineales.

Este valor es adecuado debido a la capacidad de los sensores para detectar cambios significativos dentro de ese radio. Además, en cámaras frigoríficas, la ventilación forzada mejora la homogeneidad del aire, lo que asegura que dentro de este volumen las variaciones de temperatura y humedad sean detectables, sin requerir más sensores en distancias menores.

3. Fórmula:

$$\text{Número de Modulos} = \frac{\text{Volumen de la Camara}}{\text{rea de Cobertura por Módulo}}$$

Ejemplo: Para una cámara de 5 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de alto:

$$\text{Volumen} = 5 \times 4 \times 3 = 60 \text{ m}^3$$

Número de Módulos:

$$\text{Número de Modulos} = \frac{60 \text{ m}^3}{10 \text{ m}^3} = 6 \text{ módulos}$$

En este caso, se requieren 6 módulos distribuidos uniformemente en la cámara.

4. Distribución y Estratificación Térmica:

- Se debe considerar la estratificación térmica (diferencia de temperatura entre las distintas alturas de la cámara). Por lo general, el aire caliente tiende a subir, por lo que se recomienda instalar sensores en al menos tres niveles de altura (suelo, medio y techo) para detectar cualquier gradiente significativo.

Conectividad y Comunicación entre Módulos

Uno de los desafíos en el diseño de cámaras frigoríficas es la comunicación inalámbrica, ya que las paredes metálicas y el aislamiento pueden interferir con las señales Wi-Fi. Para mitigar este problema, se ha desarrollado una topología híbrida de comunicación:

1. Módulo de Sensado Maestro Cableado:

- Este módulo está conectado directamente al módulo de control mediante RS-485. Se encarga de recibir los datos de los demás módulos de sensado esclavos y actuar como intermediario.

2. Módulos de Sensado Esclavos:

- Los módulos esclavos se comunican con el módulo maestro utilizando Wi-Fi interno dentro de la cámara. Esta arquitectura asegura que los datos se transmitan de manera confiable.

3. Topología de Red:

- Se adopta una topología en estrella, donde los módulos esclavos envían datos al módulo maestro, quien se encarga de transmitir la información al módulo de control.

influir un diagrama de conexión entre los módulos que ejemplifique el texto

figura diagrama de conexión entre módulos

Ventajas de la Solución Propuesta

1. Mejora en la Comunicación:

- Al combinar comunicación cableada e inalámbrica, se garantiza la confiabilidad en la transmisión de datos en entornos industriales exigentes.

2. Flexibilidad y Escalabilidad:

- La arquitectura modular permite una fácil expansión, lo que es útil en cámaras frigoríficas de diferentes tamaños.

3. Optimización de Recursos:

- El enfoque de centralizar la comunicación en el módulo maestro simplifica la gestión de la red y facilita la instalación de módulos adicionales según sea necesario.

4.3.2 Módulo de Control

Control de Potencia

El módulo de control del SMCA es responsable de gestionar tanto las señales de control ON/OFF como el control de potencia modulada, actuando sobre los actuadores que mantienen las condiciones de la cámara frigorífica.

Relés y Transistores NPN 2N3904

Los relés del sistema son controlados por transistores NPN 2N3904, que permiten al ESP32 activar o desactivar los relés sin manejar directamente las altas corrientes de los actuadores. Esto protege los pines de salida del microcontrolador y asegura una separación eléctrica entre el control de bajo voltaje y los dispositivos de alta potencia, prolongando la vida útil del sistema.

Funcionamiento técnico:

- El **2N3904** actúa como un interruptor que, al recibir una señal desde el ESP32, permite que la corriente pase a través del relé, activando o desactivando el actuador conectado.
- Este método asegura que los relés, los cuales manejan cargas de hasta 2500W en AC, no afecten directamente la lógica de control y que el microcontrolador opere sin riesgo de daños.

Control de Potencia Modulada

Para el control de dispositivos de alta potencia, como la **resistencia calefactora de 2kW** y el sistema de **control de velocidad del aire**, el SMCA emplea un sistema de control de fase utilizando **TRIACs**.

- **TRIAC BT137-600:** Se seleccionó este TRIAC para el control de motores del sistema debido a su capacidad para manejar hasta 8 A en AC, ideal para los motores de la cámara.
- **TRIAC BT138-600:** Para la resistencia calefactora, se eligió este TRIAC capaz de manejar hasta 12 A, proporcionando un control eficiente de la potencia entregada.

El circuito detecta el **cruce por cero** de la señal de corriente alterna, lo que permite al microcontrolador ajustar el tiempo de activación del TRIAC para modular la potencia. Esta técnica garantiza un control preciso de la temperatura y reduce la generación de armónicos.

Comunicación con la Pantalla Principal

El módulo de control se comunica con la **pantalla principal ESP32-8048S070** a través del protocolo I2C.

- **Datos del usuario:** La pantalla recibe las configuraciones del usuario y las envía al módulo de control.
- **Datos del sistema:** El módulo de control actualiza la pantalla con los estados de los actuadores y las condiciones actuales dentro de la cámara frigorífica, proporcionando retroalimentación al usuario en tiempo real.

Tabla XI Resumen de Especificaciones del Módulo de
Sensado

Parámetro	Especificación
Microcontrolador	ESP32
Relés Controlados	5 relés (iluminación, enfriamiento, secado, humidificación, recambio de aire)
Potencia controlada	TRIAC BT137-600 (motores), TRIAC BT138-600 (resistencia de 2kW)
Transistores	NPN 2N3904 para control de relés
Comunicación	I2C (Pantalla principal), Wi-Fi (802.11 b/g/n)
Voltaje Operativo	5VDC
Pantalla	Conexión con pantalla ESP32-8048S070 vía I2C
Dimensiones de la PCB	74 mm x 64 mm

4.3.3 Módulos de Control de Potencia

Los módulos de control de potencia en el SMCA gestionan el encendido y apagado de los actuadores mediante un sistema ON/OFF controlado por relés, y el ajuste de potencia en cargas como la resistencia calefactora y los motores de circulación de aire mediante un sistema de control de potencia modulada con TRIAC. A continuación, se detallan estos sistemas.

Control ON/OFF

El módulo de relés es el encargado de manejar el encendido y apagado de los sistemas de refrigeración, secado de aire, iluminación, humidificación y recambio de aire dentro de la cámara frigorífica. Los relés son controlados por el módulo de control mediante transistores NPN 2N3904, que permiten enviar la señal de control desde el microcontrolador a los relés, asegurando el funcionamiento adecuado de los actuadores.

Cálculos de Potencia y Capacidad de los Relés

Cada relé seleccionado tiene una capacidad de **10 A**, lo que permite manejar hasta **2200 W** en una línea de **220 V**. Este valor es más que suficiente para los actuadores que consumen hasta **500 W**, como los sistemas de refrigeración y secado de aire.

El cálculo de la corriente máxima que debe soportar cada relé se realiza utilizando la fórmula:

$$I = \frac{P}{V_{\text{RMS}}}$$

Donde:

- P es la potencia en vatios (W).
- V_{RMS} es la tensión RMS de la línea en voltios (V).
- I es la corriente en amperios (A).

Por ejemplo, para un actuador con un consumo de **500 W** y una tensión de **220 V RMS**:

$$I = \frac{500 \text{ W}}{220 \text{ V}} \approx 2.27 \text{ A}$$

Dado que la capacidad máxima de los relés es de **10 A**, se garantiza un amplio margen de seguridad en el sistema.

Control de Potencia Modulada

El sistema de control de potencia modulada en el SMCA tiene como función gestionar la resistencia calefactora de 2 kW y la velocidad de los motores utilizados para controlar la circulación del aire en la cámara frigorífica. El circuito general implementa dos TRIACs: uno para los motores (BT137-600) y otro para la resistencia (BT138-600E), controlando la potencia suministrada a las cargas. Se utiliza un detector de cruce por cero con un optoacoplador para aislar la lógica de control del microcontrolador de las señales de alta tensión alterna (CA). A continuación, se explica el funcionamiento detallado y se corrigen y amplían los cálculos involucrados para ajustar la potencia de manera modulada.

Funcionamiento del Control de Fase

El control de fase permite ajustar el porcentaje de potencia entregado a las cargas (motores y resistencia) mediante la activación del TRIAC en un punto específico del ciclo de la señal de CA. Al retrasar el momento en que se activa el TRIAC dentro de cada semiciclo de la señal CA, se controla la cantidad de energía suministrada a la carga.

Detección de Cruce por Cero:

Se utiliza un optoacoplador **TLP620** para la detección de cruce por cero. Este dispositivo detecta el momento en que la señal de CA cruza por 0 V, lo cual ocurre dos veces en cada ciclo de 50 Hz (cada 10 ms). La salida del optoacoplador se envía al microcontrolador **ESP32**, generando una interrupción que sirve como referencia temporal para el disparo del TRIAC.

Disparo del TRIAC:

El ESP32 calcula el **ángulo de disparo** necesario para lograr el porcentaje de potencia deseado. Este ángulo determina el tiempo de retardo desde el cruce por cero hasta la activación del TRIAC. Se utilizan optoacopladores MOC3021M para activar los TRIACs, proporcionando aislamiento entre la lógica de control y la alta tensión CA.

Cálculo del Ángulo de Disparo del TRIAC

El control de potencia se realiza ajustando el **ángulo de disparo** (α), que corresponde al retraso desde el cruce por cero hasta el momento en que se activa el TRIAC dentro de cada semicírculo de la señal CA.

Relación entre Potencia y Ángulo de Disparo:

Para una carga resistiva, la potencia media entregada en función del ángulo de disparo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{max}}} = \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \sin(\alpha) \cos(\alpha))$$

Simplificando:

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{max}}} = \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right)$$

Donde:

- P_{out} es la potencia media entregada a la carga.
- P_{max} es la potencia máxima (cuando el TRIAC conduce durante todo el semicírculo, es decir, $\alpha = 0^\circ$).
- α es el ángulo de disparo en radianes (entre 0 y π).

Cálculo del Tiempo de Retardo (t_d):

El tiempo de retardo desde el cruce por cero hasta el disparo del TRIAC se calcula como:

$$t_d = \frac{\alpha}{\omega}$$

Donde:

- t_d es el tiempo de retardo en segundos.
- $\omega = 2\pi f$ es la velocidad angular de la señal CA.
- Para $f = 50 \text{ Hz}$, $\omega = 314.16 \text{ rad/s}$

Alternativamente:

$$t_d = \frac{\alpha}{\pi} \cdot \left(\frac{T}{2} \right)$$

Donde:

- $T = \frac{1}{f}$ es el período de la señal CA.
- $\frac{T}{2}$ es la duración de un semicírculo (10 ms para 50 Hz).

Ejemplo de Cálculo:

Para obtener el 50% de la potencia en una resistencia de 2000 W:

1. Encontrar el ángulo de disparo (α) que corresponde al 50% de potencia.

Resolvemos la ecuación:

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{max}}} = 0.5 = \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right)$$

Multiplicando ambos lados por π :

$$0.5\pi = \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}$$

Simplificando:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\sin(2\alpha)}{2}$$

Esta es una ecuación trascendental que debe resolverse numéricamente. El ángulo que satisface esta ecuación es aproximadamente $\alpha = 1.23 \text{ rad (70}^{\circ}\text{)}$.

2. Calcular el tiempo de retardo (t_d):

$$t_d = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{1.23 \text{ rad}}{314.16 \text{ rad/s}} \approx 3.91 \text{ ms}$$

Consideraciones de Seguridad en los Ángulos de Disparo

Límites de Ángulo de Disparo:

Para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema, se establecen límites en los ángulos de disparo:

- **Ángulo mínimo** (α_{\min}) : 20° (0.35 rad)
- **Ángulo máximo** (α_{\max}) : 160° (2.79 rad)

Implicaciones:

- Si se requiere una potencia menor a la correspondiente a α_{\max} , se desactiva el TRIAC, no entregando potencia a la carga (0%).
- Si se requiere una potencia mayor a la correspondiente a α_{\min} , el TRIAC se activa inmediatamente después del cruce por cero ($\alpha = 0^\circ$), entregando potencia máxima (100%).

Cálculo de Potencia en los Límites:

- **Potencia mínima (ángulo máximo):**

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\max}} = \frac{1}{\pi} \left(\pi - 2.79 + \frac{\sin(5.58)}{2} \right) \approx 0.09$$

Es decir, con un ángulo de 160° , se entrega aproximadamente el **9% de la potencia máxima**. Para potencias menores, se considera que el sistema no es eficiente y se establece la potencia en **0%**.

- **Potencia máxima (ángulo mínimo):**

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\max}} = \frac{1}{\pi} \left(\pi - 0.35 + \frac{\sin(0.70)}{2} \right) \approx 0.91$$

Se entrega aproximadamente el **91% de la potencia máxima**. Para potencias mayores, se establece la potencia en **100%**.

*Implementación del TRIAC para Control de Motores y Resistencia***Control de Velocidad de Motores:**

- **TRIAC: BT137-600**
- **Optoacoplador: MOC3021M**
- **Transistor de Control: 2N3904 (Q2)**
- **Carga: Motores de ventilación**

Control de Potencia de la Resistencia:

- **TRIAC: BT138-600E**
- **Optoacoplador: MOC3021M**
- **Transistor de Control: 2N3904 (Q3)**
- **Carga: Resistencia calefactora de 2000 W**

En ambos casos, el ESP32 genera el tiempo de retardo adecuado para disparar el TRIAC, respetando los límites de ángulo de disparo establecidos por seguridad.

Integración con el Detector de Cruce por Cero

El detector de cruce por cero genera una interrupción en el ESP32 cada vez que la señal de CA pasa por 0 V. El ESP32 realiza los siguientes pasos:

1. **Registra el evento de cruce por cero.**
2. **Calcula el tiempo de retardo (t_d)** en función del ángulo de disparo deseado.
3. **Inicia un temporizador** que cuenta el tiempo t_d .
4. **Al finalizar el temporizador**, activa el optoacoplador MOC3021M correspondiente, disparando el TRIAC.

Este proceso se repite en cada semicírculo de la señal CA, permitiendo un control preciso de la potencia entregada.

Análisis

El control de potencia modulada mediante TRIACs y control de fase permite ajustar eficientemente la potencia entregada a la resistencia calefactora y a los motores de ventilación en la cámara frigorífica. Al establecer límites de ángulo de disparo entre 20° y 160°, se garantiza la seguridad y el funcionamiento óptimo del sistema, evitando operar en rangos donde la potencia es demasiado baja o demasiado alta, lo que podría comprometer la integridad de los componentes y la eficacia del control.

4.4 Diseño de Software

El objetivo de este capítulo es describir el diseño del software que controla el Sistema Modular de Control Ambiental (SMCA). Se detallan las arquitecturas de software utilizadas, los módulos y componentes principales, los flujos de datos y cómo interactúan los diferentes elementos para lograr un control eficiente y confiable de las condiciones ambientales en las cámaras frigoríficas.

4.4.1 Introducción al Diseño de Software

El software en el SMCA es fundamental para gestionar la interacción entre los sensores, actuadores y el módulo de control. La integración del software con el hardware previamente descrito permite automatizar las acciones necesarias para mantener las condiciones ambientales óptimas dentro de la cámara frigorífica.

Se ha adoptado una **metodología ágil** para el desarrollo del software, lo que permite iterar rápidamente funcionalidades y corregir errores a lo largo del proyecto. El software está desarrollado principalmente en **C** y **C++**, utilizando el framework **ESP-IDF** (Espressif IoT Development Framework) y el sistema operativo en tiempo real **FreeRTOS**, lo que garantiza una gestión eficiente de las tareas y los recursos del sistema en tiempo real.

4.4.2 Requisitos del Software

Requisitos Funcionales

- **Lectura y Procesamiento de Datos de Sensores:**
 - Adquisición periódica de datos de los sensores **DS18B20** (temperatura) y **AM2320** (temperatura y humedad).
 - Filtrado y procesamiento de los datos para eliminar ruido y obtener mediciones precisas.
- **Control de Actuadores:**
 - Gestión de los **relés** y **TRIACs** para controlar la refrigeración, ventilación, secado y humidificación.
 - Implementación de algoritmos de control para mantener las condiciones ambientales dentro de los parámetros establecidos.
- **Comunicación con Módulos y Pantalla Principal:**
 - Transmisión y recepción de datos con la pantalla principal y otros módulos a través de **Wi-Fi** e **I2C**.
- **Gestión de Alarmas y Eventos:**
 - Monitoreo continuo de los valores de los sensores.
 - Generación de alarmas y notificaciones cuando se detecten desviaciones fuera de los límites establecidos.

Requisitos No Funcionales

- **Eficiencia y Optimización Energética:**
 - Implementación de modos de bajo consumo para prolongar la duración de la batería en los módulos de sensado.
 - Uso eficiente de los recursos del sistema para minimizar el consumo de energía.
- **Confiabilidad y Tolerancia a Fallos:**
 - Mecanismos de recuperación ante errores y fallos en la comunicación.
 - Monitorización de la integridad del sistema y reinicios seguros en caso necesario.
- **Seguridad y Protección de Datos:**
 - Protección de los datos transmitidos entre módulos mediante encriptación.
 - Control de acceso y autenticación en las comunicaciones.
- **Escalabilidad y Modularidad:**
 - Diseño modular que permita agregar o quitar componentes sin afectar al sistema global.
 - Capacidad para adaptarse a futuras expansiones y modificaciones del sistema.
- **Compatibilidad con Estándares y Protocolos de Comunicación:**
 - Soporte para **Wi-Fi**, **I2C** y **RS-485**.
 - Cumplimiento de estándares industriales para garantizar la interoperabilidad.

4.4.3 Arquitectura del Software

El diseño del software sigue una **arquitectura en capas**, adoptando el patrón de diseño **Modelo-Vista-Controlador (MVC)**. Esta arquitectura permite separar las responsabilidades del sistema, facilitando el mantenimiento y la escalabilidad.

Diagrama de Bloques del Software

Figura 5.1: Diagrama de bloques del software SMCA que muestra la interacción entre los módulos de sensado, control, comunicación y la interfaz de usuario.

(Nota: Incluir aquí el diagrama de bloques correspondiente.)

Descripción de Módulos

a) Módulo de Sensado

- **Funcionalidad:**
 - Lectura de los sensores **DS18B20** y **AM2320**.
 - Procesamiento y filtrado de datos para obtener mediciones precisas.
 - Envío de los datos procesados al módulo de control a través de **Wi-Fi** o **I2C**.
- **Características:**
 - Operación en modo de bajo consumo (deep sleep) cuando no está realizando mediciones.
 - Gestión de la batería y monitoreo del nivel de carga.

b) Módulo de Control

- **Funcionalidad:**
 - Recepción de datos de los módulos de sensado.
 - Implementación de algoritmos de control (PID) para temperatura y humedad.
 - Generación de señales de control para los **actuadores** (TRIACs y relés).
 - Comunicación con la pantalla principal y el servidor.
- **Características:**
 - Manejo de interrupciones, especialmente para el **detector de cruce por cero**.
 - Estrategias de seguridad, como límites de ángulo de disparo para los TRIACs.

c) Módulo de Comunicación

- **Funcionalidad:**
 - Gestión de las comunicaciones entre módulos y con el servidor principal.
 - Soporte para **Wi-Fi**, **I2C** y **RS-485**.
 - Mecanismos de sincronización y transmisión de datos confiables.
- **Características:**
 - Implementación de protocolos de comunicación seguros.
 - Manejo de errores y reconexión automática.

d) Interfaz de Usuario

- **Funcionalidad:**
 - Interacción con la pantalla principal **ESP32-8048S070**.
 - Visualización de las condiciones ambientales y estados del sistema.
 - Menús y opciones para ajustar parámetros y configurar el sistema.
- **Características:**
 - Diseño intuitivo y fácil de usar.
 - Actualización en tiempo real de la información.

e) Gestión de Energía

- **Funcionalidad:**
 - Control de modos de bajo consumo en los módulos de sensado.
 - Monitoreo del nivel de batería y notificaciones al sistema de control.
- **Características:**
 - Desactivación de periféricos innecesarios para optimizar el consumo.
 - Programación de ciclos de actividad y medición.

4.4.4 Detalles de Implementación

Lenguajes de Programación Utilizados

- **C/C++:** Utilizados para el desarrollo del firmware en los microcontroladores ESP32.
- **Framework ESP-IDF:** Proporciona librerías y herramientas específicas para el ESP32, permitiendo un control detallado del hardware y optimización del rendimiento.
- **FreeRTOS:** Sistema operativo en tiempo real que facilita la gestión de tareas concurrentes, semáforos y temporizadores.

Uso de FreeRTOS

- **Tareas y Prioridades:**
 - **Tarea de Sensado:** Lectura de sensores y envío de datos. Prioridad media.
 - **Tarea de Control:** Procesamiento de datos y ajuste de actuadores. Prioridad alta.
 - **Tarea de Comunicación:** Gestión de mensajes y conexiones. Prioridad media.
 - **Tarea de Interfaz de Usuario:** Actualización de la pantalla y respuesta a entradas del usuario. Prioridad baja.
- **Manejo de Interrupciones:**
 - **Detector de Cruce por Cero:** Genera una interrupción que activa el disparo del TRIAC después del tiempo de retardo calculado.
 - **Interrupciones de Comunicación:** Manejo de eventos de Wi-Fi y I2C.

Algoritmos de Control

- **Control PID:**
 - Utilizado para mantener la temperatura y humedad en los valores deseados.

- Ajuste de parámetros (proporcional, integral, derivativo) basado en pruebas empíricas.
- **Control de Fase para TRIACs:**
 - Cálculo del ángulo de disparo (α) en función de la potencia requerida.
 - Implementación de límites de seguridad en los ángulos de disparo.

Gestión de Sensores

- **Protocolos de Comunicación:**
 - **1-Wire:** Utilizado por el **DS18B20** para la lectura de temperatura.
 - **I2C:** Utilizado por el **AM2320** para la lectura de temperatura y humedad.
- **Manejo de Errores y Reconexión:**
 - Detección de fallos en la comunicación y reintentos automáticos.
 - Validación de datos recibidos para asegurar su integridad.
- **Monitoreo del Nivel de Batería:**
 - Lectura del voltaje de la batería mediante el ADC del ESP32.
 - Advertencias en caso de niveles bajos de carga.

Comunicación entre Módulos

- **Topología de Red:**
 - **Módulo Maestro:** Conectado al módulo de control vía **RS-485**.
 - **Módulos Esclavos:** Comunican con el maestro mediante **Wi-Fi**.
- **Mecanismos de Sincronización:**
 - Uso de timestamps para sincronizar datos.
 - Protocolos de confirmación de recepción y reenvío en caso de pérdida.

Interfaz de Usuario

- **Desarrollo de la Interfaz:**
 - Programación de la pantalla **ESP32-8048S070** para mostrar información relevante.
 - Menús intuitivos para configuración y monitoreo.
- **Navegación y Usabilidad:**
 - Diseño de botones y opciones accesibles.
 - Retroalimentación visual para las acciones del usuario.

Actualizaciones y Mantenimiento

- **Registro de Logs y Diagnóstico:**
 - Almacenamiento de eventos y errores en memoria para análisis posterior.
 - Herramientas de depuración y monitoreo en tiempo real.
- **Mantenimiento:**
 - Posibilidad de actualizaciones Over-The-Air (OTA) para el firmware.
 - Planificación de tareas de mantenimiento preventivo.

4.4.5 Gestión de Energía y Optimización

Modos de Bajo Consumo

- **Configuración del ESP32 en Deep Sleep:**
 - Reducción del consumo a unos pocos microamperios.
 - Despertar periódico para realizar mediciones y transmisiones.
- **Desactivación de Periféricos Innecesarios:**
 - Apagado de módulos Wi-Fi y Bluetooth cuando no se utilizan.
 - Deshabilitación de sensores entre mediciones.

Programación de Ciclos de Actividad

- **Frecuencia de Medición y Transmisión de Datos:**
 - Determinada en función de la necesidad de precisión y el consumo energético.
 - Por ejemplo, mediciones cada 5 minutos.
- **Balance entre Precisión y Consumo Energético:**
 - Ajuste dinámico de la frecuencia de medición según las condiciones ambientales.

Optimización del Código

- **Uso Eficiente de Recursos:**
 - Optimización de algoritmos para reducir el tiempo de procesamiento.
 - Liberación de memoria y recursos no utilizados.
- **Minimización de Operaciones Intensivas:**
 - Evitar cálculos complejos en tiempo de ejecución.
 - Precalcular valores cuando sea posible.

Monitoreo y Alertas

- **Detección de Niveles Bajos de Batería:**
 - Notificaciones al sistema de control y al usuario.
 - Toma de acciones como reducir la frecuencia de medición.
- **Notificaciones al Sistema de Control:**
 - Envío de alertas en caso de fallos o condiciones críticas.

4.4.6 Pruebas y Validación del Software

Plan de Pruebas

- **Pruebas Unitarias:**
 - Verificación de cada módulo de software de forma individual.
 - Pruebas de funciones críticas y manejo de errores.
- **Pruebas de Integración:**
 - Evaluación de la interacción entre módulos.

- Pruebas de comunicación y sincronización de datos.
- **Pruebas de Sistema:**
 - Simulación de condiciones reales de operación.
 - Pruebas de estrés y rendimiento bajo diferentes cargas.

Resultados de Pruebas

- **Casos de Prueba y Resultados Obtenidos:**
 - **Lectura de Sensores:** Lecturas precisas y estables en diferentes condiciones.
 - **Control de Actuadores:** Respuesta adecuada a las variaciones de temperatura y humedad.
 - **Comunicación:** Transmisión de datos sin pérdidas significativas.
- **Correcciones y Mejoras Realizadas:**
 - Ajustes en los algoritmos de control PID.
 - Optimización de la gestión de energía en los módulos de sensado.
 - Mejora en la reconexión automática en caso de pérdida de señal Wi-Fi.

Validación en Entorno Real

- **Pruebas en Cámaras Frigoríficas Operativas:**
 - Instalación del SMCA en cámaras reales y monitoreo durante períodos prolongados.
- **Análisis de Desempeño Bajo Diferentes Condiciones:**
 - Evaluación del sistema ante cambios bruscos de temperatura y humedad.
 - Verificación de la autonomía de la batería en condiciones de baja temperatura.

4.5 Diseño Constructivo del SMCA

El diseño constructivo del SMCA se desarrolló con un enfoque en la robustez, facilidad de instalación y cumplimiento de normativas industriales de protección. Se utilizaron herramientas avanzadas de diseño asistido por computadora (CAD) y tecnologías de fabricación aditiva para crear las carcasa y soportes necesarios para los módulos de sensado y control.

4.5.1 Criterios de Diseño para Protección IP65

La norma **IP65** asegura que el equipo esté completamente protegido contra el polvo y contra chorros de agua desde cualquier dirección. Sin embargo, es importante destacar que en el diseño del SMCA, la protección **IP65** se aplicó específicamente al **microcontrolador** y a las **baterías**, componentes sensibles que requieren protección adicional.

- **Cámara Sellada para Microcontrolador y Baterías:** La carcasa cuenta con una **cámera sellada** donde se alojan el microcontrolador **ESP32** y las baterías. Esta sección está diseñada con ranuras y alojamientos para **sellos de silicona**, proporcionando una estanqueidad óptima y evitando la entrada de polvo y agua. Los **pasacables** con juntas

de goma se utilizan para las conexiones eléctricas, manteniendo la integridad de la protección IP65 sin comprometer la funcionalidad.

- **Espacio Ranurado para Sensores:** Fuera de la cámara sellada, la carcasa dispone de un **espacio ranurado** donde se alojan los **sensores**. Este diseño permite que los sensores estén en contacto directo con el ambiente, lo cual es esencial para realizar mediciones precisas de temperatura y humedad. Las ranuras permiten el flujo de aire y la exposición necesaria sin exponer el resto de los componentes a las condiciones ambientales adversas.

4.5.2 Balance entre Protección y Funcionalidad

El diseño de las carcchas tuvo que equilibrar la necesidad de proteger los componentes electrónicos sensibles y permitir que los sensores funcionen correctamente:

- **Exposición Controlada de Sensores:** Al permitir que los sensores estén en contacto con el ambiente, se garantiza la precisión en las mediciones. Sin embargo, se implementaron medidas para proteger los sensores, especialmente el AM2320, de la exposición directa al agua.
- **Ventilación Adecuada:** Las ranuras y aberturas están diseñadas para permitir el flujo de aire necesario sin comprometer la protección del microcontrolador y las baterías.
- **Compatibilidad con Normativas:** Aunque los sensores no están cubiertos completamente por la protección IP65 debido a su necesidad de estar expuestos, el resto del sistema cumple con los requisitos de la norma, asegurando la protección de los componentes críticos.

4.5.3 Uso de Impresión 3D

La fabricación de las carcchas y soportes de los módulos se realizó mediante impresión 3D utilizando material **PETG**, en lugar de **PLA**, debido a sus mejores propiedades mecánicas y resistencia a la humedad y temperaturas extremas. Algunas ventajas de utilizar PETG incluyen:

- **Resistencia a la Humedad y Temperatura:** El PETG es menos susceptible a deformaciones por absorción de humedad y tiene una mejor resistencia térmica que el PLA, lo que lo hace más adecuado para entornos industriales.
- **Flexibilidad de Diseño:** Permite crear encastres y geometrías complejas para ajustar con precisión los módulos de sensado y control, mejorando la facilidad de instalación y mantenimiento.
- **Prototipado Rápido:** La impresión 3D facilita la iteración rápida del diseño, permitiendo realizar ajustes y mejoras basadas en pruebas prácticas.

Figuras 6.1 a 6.4: Carcasas de los módulos del SMCA.

- **Figura 6.1:** Carcasa del módulo de sensado con protección IP65. [Fuente: Elaboración propia]
- **Figura 6.2:** Carcasa del módulo de control. [Fuente: Elaboración propia]

- **Figura 6.3:** Carcasa del módulo de control de potencia. [Fuente: Elaboración propia]
- **Figura 6.4:** Carcasa de la pantalla principal. [Fuente: Elaboración propia]

(Nota: Incluir aquí las imágenes correspondientes a cada figura.)

4.6 Diseño de la PCB

El diseño de la **placa de circuito impreso (PCB)** para los módulos de control y sensado se llevó a cabo utilizando el software **KiCad**, una herramienta de diseño de circuitos impresos de código abierto que permitió integrar todas las funcionalidades del SMCA en una única PCB para ambos módulos.

4.6.1 Diseño Unificado de la PCB de Control y Sensado

El diseño de la PCB se concibió para ser compartido entre el módulo de control y el módulo de sensado, optimizando costos y facilitando la fabricación y el ensamblaje. Las diferencias entre los módulos radican en los componentes instalados:

- **Módulo de Sensado:**
 - Componentes para la lectura de datos de los sensores **DS18B20** y **AM2320**.
 - Microcontrolador **ESP32** configurado en modo de bajo consumo.
 - Circuitería de gestión de batería y carga.
- **Módulo de Control:**
 - Componentes básicos del **ESP32**.
 - Salidas para los actuadores, incluyendo interruptores por transistor **NPN 2N3904** para los relés y el sistema de control de potencia modulado mediante **TRIACs**.
 - Salidas de alimentación y comunicación con la pantalla principal.

4.6.2 Diseño de la PCB del Módulo de Control de Potencia

Se diseñó una PCB separada para el módulo de control de potencia modulada. Este enfoque se adoptó por varias razones:

- **Reducción del Tamaño de las PCBs de Control y Sensado:** Al separar los componentes de potencia, las PCBs de control y sensado pudieron mantenerse compactas, facilitando su instalación y reduciendo costos al no requerir una PCB grande cuando se utiliza solo como módulo de sensado.
- **Seguridad y Aislamiento:** Separar la etapa de potencia de la etapa de control mejora la seguridad del sistema, reduciendo el riesgo de interferencias electromagnéticas y permitiendo un mejor manejo de las altas corrientes involucradas.
- **Flexibilidad y Modularidad:** Este diseño modular permite actualizar o modificar la etapa de potencia sin afectar el módulo de control, facilitando futuras expansiones o adaptaciones.

Figura 6.5: Diseño de la PCB del módulo de control de potencia modulado. [Fuente: Elaboración propia]

4.6.3 Fabricación de las PCBs

Las PCBs fueron fabricadas en material **FR4** de alta calidad, con un grosor de 1.6 mm y doble cara de cobre de 1 oz, asegurando la robustez y fiabilidad necesarias para aplicaciones industriales. Características clave del diseño:

- **Anchos de Pista Adecuados:**
 - **PCBs de Control y Sensado:** Las pistas fueron dimensionadas para soportar corrientes de control y señales de baja potencia, garantizando una transmisión fiable y minimizando interferencias.
 - **PCB del Módulo de Potencia:** Las pistas de potencia fueron dimensionadas para soportar corrientes de hasta **10 A**, considerando los actuadores de alta potencia. Se calcularon los anchos de pista según las normas IPC-2221, asegurando que puedan manejar las corrientes sin sobrecalentamiento.
- **Conecotores Adecuados:**
 - **Conectores JST:** Utilizados para la conexión de sensores y periféricos de bajo voltaje, facilitando conexiones seguras y confiables.
 - **Borneras Enchufables de 5.08 mm:** Empleadas para las conexiones de potencia y actuadores, permitiendo un montaje y mantenimiento sencillo.
- **Terminaciones y Acabados:**
 - **Máscara Antisoldante (Solder Mask):** Aplicada en ambas caras para proteger las pistas y evitar cortocircuitos, especialmente importante en entornos con alta humedad.
 - **Serigrafía Clara:** Identificación de componentes y conexiones, lo que facilita el ensamblaje, mantenimiento y futuras reparaciones.

4.6.4 Ensamblaje y Montaje

El ensamblaje del sistema se llevó a cabo siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la calidad y fiabilidad del SMCA. Una vez finalizado el diseño, las PCBs se mandaron a fabricar con un proveedor externo, pero el ensamblaje se realizó en el **Laboratorio de Industria 4.0 de la Facultad de Ciencias de la Alimentación**.

Montaje de Componentes Electrónicos

- **Tecnología de Orificio Pasante (THT):** Se utilizó THT para el montaje de componentes, incluyendo los de potencia y conectores, proporcionando mayor resistencia mecánica y facilitando el proceso de ensamblaje manual.
 - **Consideraciones:** Aunque la tecnología SMD (Surface Mount Device) ofrece ventajas en tamaño y automatización, para este prototipo inicial se optó por THT debido a su menor costo y facilidad de montaje en el laboratorio.

- **Futuras Iteraciones:** En futuras versiones, se espera incorporar tecnología SMD para reducir el tamaño de las PCBs y mejorar la eficiencia del ensamblaje.
- **Soldadura de Calidad:** Se empleó soldadura libre de plomo para cumplir con las normativas ambientales, asegurando conexiones eléctricas confiables y duraderas.

Integración en Carcasas

- **Ajuste Preciso:** Las PCBs y componentes se montaron dentro de las carcasas impresas en 3D, diseñadas para encajar perfectamente y asegurar la posición de los componentes, minimizando vibraciones y posibles daños.
- **Gestión de Cables:**
 - **Espacio Adecuado:** Se dispuso de espacio suficiente para el manejo de cables dentro de las carcasas, evitando tensiones y garantizando conexiones seguras.
 - **Guías y Fijaciones:** Se integraron elementos como abrazaderas y canales para organizar el cableado y facilitar el mantenimiento.
- **Sellado y Protección:**
 - **Módulos de Sensado:** Se aplicaron sellos y juntas en las carcasas para garantizar la protección **IP65**, realizando pruebas de estanqueidad que confirmaron su efectividad.
 - **Módulos de Control y Potencia:** Aunque requieren ventilación para disipar el calor generado por los componentes de potencia, se implementaron soluciones de enfriamiento pasivo sin comprometer la seguridad eléctrica.

Consideraciones Adicionales

Materiales y Sostenibilidad

- **Selección de Materiales Adecuados:** El uso de Tereftalato de Polietileno Modificado con Glicol (PETG) en lugar de ácido poliláctico (PLA) para las carcasas responde a la necesidad de materiales más resistentes y duraderos en entornos industriales, soportando mejor las condiciones de humedad y temperatura.
- **Reciclabilidad:** Tanto el PETG como el FR4 de las PCBs son materiales que pueden ser reciclados, contribuyendo a la sostenibilidad del proyecto y reduciendo el impacto ambiental.

Normativas y Cumplimiento

- **Cumplimiento de Normas:**
 - **IP65:** Garantiza la protección contra el polvo y chorros de agua desde cualquier dirección.
 - **IEC 60204-1:** Seguridad de máquinas y equipos eléctricos, asegurando que el diseño cumple con las prácticas recomendadas para prevenir riesgos eléctricos.
 - **IEC 60529:** Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP), confirmando que las carcasas cumplen con el grado de protección declarado.

- **Seguridad Eléctrica:**

- **Distancias de Seguridad y Aislamiento:** Se aseguraron distancias adecuadas entre pistas y componentes en las PCBs, especialmente en áreas de alta tensión y corriente, para prevenir arcos eléctricos y cortocircuitos.
- **Aislamiento entre Etapas de Potencia y Control:** La separación física y eléctrica entre las etapas de control y potencia reduce el riesgo de interferencias y mejora la seguridad del sistema.

Capítulo 5 - Estudio Económico

5.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad económica del **SMCA**. Se analizarán los costos asociados al desarrollo, implementación y operación del sistema, así como los beneficios financieros esperados en términos de ahorros energéticos, optimización de procesos y mejora en la calidad del almacenamiento en cámaras frigoríficas.

Realizar un análisis económico detallado es fundamental para determinar la rentabilidad del SMCA y su impacto en las operaciones industriales. Al comprender los costos y beneficios, se puede justificar la inversión y planificar estrategias para maximizar el retorno de la inversión (ROI).

5.2 Inversión Inicial

La inversión inicial abarca todos los gastos relacionados con el desarrollo, adquisición de componentes, fabricación, montaje y pruebas del SMCA. A continuación, se detallan estos costos, incluyendo las estimaciones recientes proporcionadas.

5.2.1 Costos de Componentes

Se presenta un desglose de los costos de los componentes electrónicos y mecánicos utilizados en el SMCA. Los precios indicados son valores de mercado estimados y reflejan los costos reales de adquisición.

Tabla 5.1: Costos de los Componentes Electrónicos del SMCA			
Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Microcontrolador ESP32 Dev Kit	3	\$14,89	\$44,67
Sensores DS18B20	2	\$3,78	\$7,56
Sensores AM2320	2	\$7,72	\$15,44
Relés (10 A, 250 VAC)	1	\$7,35	\$7,35
Transistores NPN 2N3904	10	\$0,60	\$6,00
TRIAC BT137-600	1	\$1,50	\$1,50
TRIAC BT138-600E	1	\$1,44	\$1,44
Optoacopladores MOC3021M	2	\$1,83	\$3,66
Optoacopladores TLP620	1	\$3,10	\$3,10
Conectores JST	20	\$0,50	\$10,00

Borneras Enchufables 5.08 mm	3	\$3,50	\$10,50
Baterías Li-ion 3.7V 4200 mAh	2	\$25,85	\$51,70
Módulos de Carga TP4056	2	\$1,20	\$2,40
Celda de carga	1	\$9,50	\$9,50
Pantalla 7.0 Tactil	1	\$156,00	\$156,00
Otros Componentes Pasivos	40	\$0,50	\$20,00
Total			\$350,82

Costo Total (USD) frente a Componente

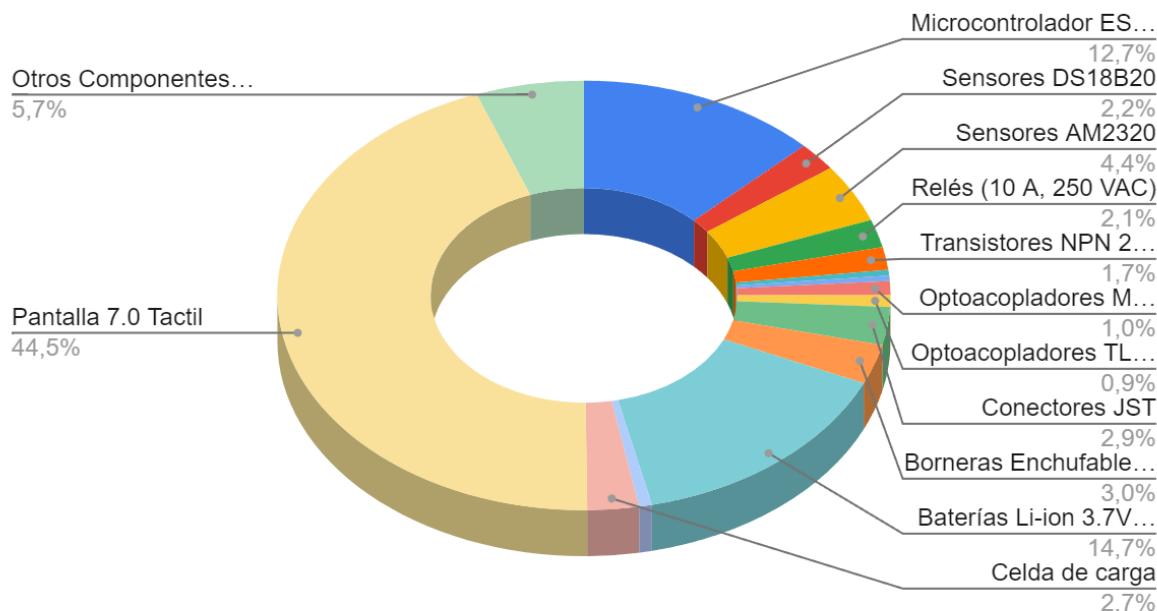


Figura 5.1 - Diagrama de costo por componente

Tabla 5.1a: Costos de Componentes Eléctricos			
Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Tablero eléctrico	1	\$130,00	\$130,00
NSYTRV22 Borne de conexión tornillo 2.5mm	10	\$1,21	\$12,10

NSYTRV42PE Borne de conexión tornillo tierra 4mm	5	\$1,51	\$7,55
Tapa de borne para BPN-2.5/4/6/10mm ²	4	\$0,60	\$2,40
DZ5CE025 Terminal de cable 1.5mm gris	60	\$0,60	\$36,00
Base fijadora 25x25mm con adhesivo	4	\$0,90	\$3,60
Total			\$191,65

Costo Total (USD) frente a Componente

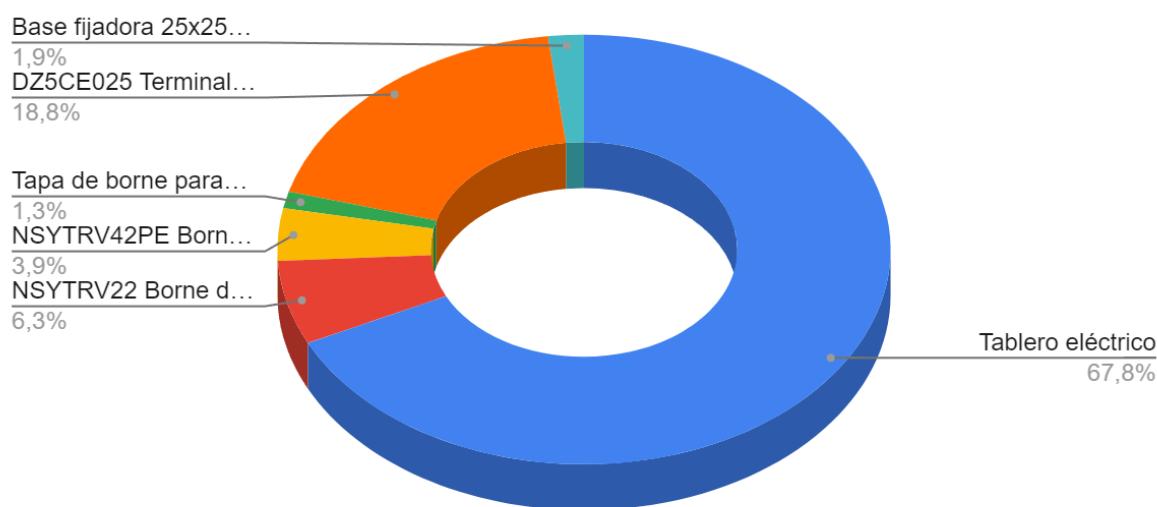


Figura 5.1a - Diagrama de costo por componente

5.2.2 Costos de Fabricación y Ensamblaje de las PCBs

Tabla 5.2: Costos de Fabricación y Ensamblaje de las PCBs			
Concepto	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Fabricación de PCBs (Control)	1	\$21,70	\$21,70

Fabricación de PCBs (Sensado)	2	\$21,70	\$43,40
Fabricación de PCBs (Potencia)	1	\$52,70	\$52,70
Ensamblaje de Componentes THT	4	\$12,50	\$50,00
Total			\$167,80

Costo Total (USD) frente a Concepto

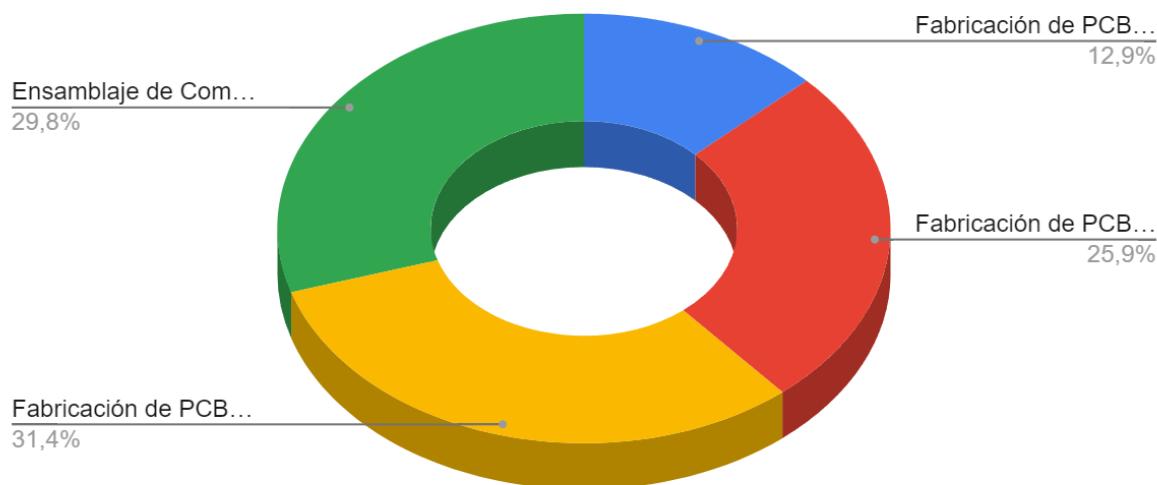


Figura 5.2 - Diagrama de costo por desarrollo

5.2.3 Costos de Desarrollo y Prototipado

a) Desarrollo de Software

El costo de desarrollo de software se estimó considerando el tiempo invertido y la tarifa de mano de obra. A continuación se detalla el desglose:

Tabla 5.3 Estimación de Tiempos de Desarrollo	
Tarea	Horas Estimadas
Desarrollo del Firmware del ESP32	
- Configuración de entorno y herramientas	8

- Lectura y procesamiento de sensores	16
- Implementación de algoritmos de control (PID)	24
- Control de actuadores (relés y TRIACs)	20
- Comunicación Wi-Fi e I2C	18
- Gestión de energía y modos de bajo consumo	12
- Manejo de interrupciones (cruce por cero)	10
- Pruebas y depuración del firmware	24
Desarrollo de la Interfaz de Usuario	
- Diseño de la interfaz gráfica	16
- Programación de menús y opciones	20
- Comunicación con el módulo de control	12
- Pruebas y ajustes de la interfaz	16
Desarrollo de Protocolos de Comunicación	
- Implementación de protocolos seguros	14
- Manejo de errores y reconexión	10
- Pruebas de comunicación	12
Documentación y Manuales	16
Total de Horas Estimadas	248

Cálculo del Costo de Desarrollo:

- **Tarifa de Mano de Obra:** \$20 por hora

Tabla 5.4: Costos de Desarrollo del Software	
Concepto	Costo (USD)
Desarrollo del Firmware del ESP32	\$4.960,00
Pruebas y Validación	\$250,00
Documentación y Manuales	\$200,00
Subtotal	\$5.410,00
Contingencia (10%)	\$541,00
Total Costo de Desarrollo de Software	\$5.951,00

b) Diseño Mecánico y Prototipado

- **Tiempo de Diseño Mecánico:** 40 horas
- **Tarifa de Mano de Obra:** \$20 por hora
- **Costo de Diseño:** 40 horas * \$20/hora = **\$800.00**

Costos de Prototipado:

- **Materiales (Filamento PETG):**
 - Cantidad utilizada: 2 kg
 - Costo por kg: \$30.00
 - **Costo de Materiales:** $2 \text{ kg} * \$30.00 = \60.00
- **Costos de Impresión 3D:**
 - Tiempo total de impresión: 50 horas
 - Costo por hora: \$2.00
 - **Costo de Impresión:** $50 \text{ horas} * \$2.00/\text{hora} = \100.00

Costo Total de Diseño Mecánico y Prototipado:

- **\$800.00 (diseño) + \$60.00 (materiales) + \$100.00 (impresión) = \$960.00**

5.2.4 Mano de Obra

- **Ensamblaje de Unidades:**
 - Tiempo por unidad: 2 horas
 - Número de unidades: 5
 - Tiempo total: $2 \text{ horas/unidad} * 5 \text{ unidades} = 10 \text{ horas}$
- **Instalación y Configuración:**
 - Tiempo estimado: 8 horas
- **Tiempo Total de Mano de Obra:** $10 \text{ horas} + 8 \text{ horas} = 18 \text{ horas}$
- **Tarifa de Mano de Obra:** \$15 por hora
- **Costo Total de Mano de Obra:** $18 \text{ horas} * \$15/\text{hora} = \270.00

5.2.5 Infraestructura y Equipos de Prueba

- **Uso del Laboratorio:**
 - Tiempo de uso: 20 horas
 - Costo por hora: \$10.00
 - **Costo de Uso del Laboratorio:** $20 \text{ horas} * \$10.00/\text{hora} = \200.00
- **Herramientas y Equipos Adicionales:**
 - Pequeñas herramientas y consumibles: **\$100.00**
- **Costo Total de Infraestructura y Equipos de Prueba:** $\$200.00 + \$100.00 = \$300.00$

5.2.6 Total de Inversión Inicial

Tabla 5.5 Resumen de Inversión Inicial	
Concepto	Costo Total (USD)
Costos de Componentes (Tabla 5.1)	\$350,82
Costos de Componentes eléctricos (Tabla 5.1a)	\$191,65

Fabricación y Ensamblaje (Tabla 5.2)	\$167,80
Desarrollo de Software	\$5.951,00
Diseño Mecánico y Prototipado	\$960,00
Mano de Obra	\$270,00
Infraestructura y Equipos de Prueba	\$300,00
Total Inversión Inicial	\$8.191,27

Costo Total (USD)

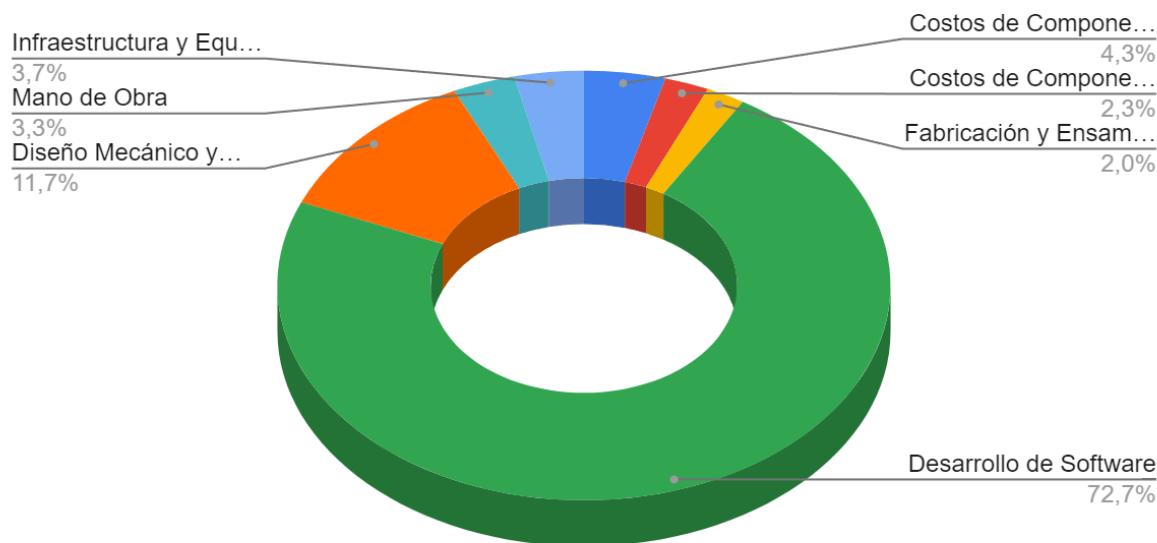


Figura 5.2 - Diagrama de costo total

5.3 Costos Operativos

Una vez instalado el SMCA, existen costos recurrentes asociados a su operación y mantenimiento.

5.3.1 Consumo Energético

Tarifa Energética:

- **Costo promedio por kWh:** \$0.10

Tabla 5.4: Consumo Energético y Costos Asociados			
Módulo/Dispositivo	Consumo Diario (kWh)	Costo Diario (USD)	Costo Mensual (USD)
Módulos de Sensado	0,2	0,02	0,6
Módulo de Control	0,2	0,02	0,6
Actuadores	2	0,2	6
Total	2,4	0,24	7,2

5.3.2 Mantenimiento y Reemplazo de Componentes

a) Reemplazo de Baterías

- **Vida útil estimada:** 2 años
- **Costo de reemplazo por unidad:** \$25.85
- **Número de baterías:** 2
- **Costo anualizado:** $(2 * \$25.85) / 2 \text{ años} = \25.85

b) Reemplazo de Módulos de Sensado

- **Vida útil estimada:** 5 años
- **Costo de reemplazo por unidad:** $(\$3.78 + \$7.72) = \$11.50$
- **Número de módulos:** 2
- **Costo anualizado:** $(2 * \$11.50) / 5 \text{ años} = \4.60

c) Reemplazo de Módulo de Control

- **Vida útil estimada:** 5 años
- **Costo de reemplazo:** \$44.67 (ESP32 Dev Kit)
- **Costo anualizado:** $\$44.67 / 5 \text{ años} = \8.93

d) Mano de Obra de Mantenimiento

- **Tiempo estimado anual:** 10 horas
- **Costo de mano de obra por hora:** \$25.00
- **Costo anual:** $10 \text{ horas} * \$25.00/\text{hora} = \250.00

Tabla 5.5: Costos Anuales de Mantenimiento

Tabla 5.7 Costos Anuales de Mantenimiento	
Concepto	Costo Anual (USD)
Reemplazo de Baterías	20

Reemplazo de Módulo de Sensado	7
Reemplazo de Módulo de Control	6
Mano de Obra de Mantenimiento	250
Total Costos Operativos	283

5.3.3 Actualización del Software

- **Frecuencia de actualizaciones:** Anual
 - **Tiempo estimado:** 10 horas
 - **Tarifa de mano de obra:** \$25.00 por hora
 - **Costo anual de actualización:** 10 horas * \$25.00/hora = **\$250.00**
-

5.4 Ahorros Operativos y Beneficios

La implementación del SMCA genera beneficios financieros significativos, derivados de la optimización energética y la mejora en los procesos operativos.

5.4.1 Ahorro Energético

- **Consumo energético previo al SMCA:** 100,000 kWh/año
- **Porcentaje de ahorro estimado:** 10%
- **Ahorro anual en consumo energético:** 100,000 kWh * 10% = 10,000 kWh
- **Ahorro anual en costos de energía:** 10,000 kWh * \$0.10/kWh = **\$1,000.00**

5.4.2 Ahorro en Mantenimiento

- **Costos de mantenimiento previos:** \$2,000.00/año
- **Reducción estimada en costos de mantenimiento:** 20%
- **Ahorro anual en mantenimiento:** \$2,000.00 * 20% = **\$400.00**

5.4.3 Mejora en la Calidad del Producto

- **Valor anual de productos almacenados:** \$50,000.00
- **Reducción en pérdidas de productos:** 5%
- **Ahorro anual por mejora en calidad:** \$50,000.00 * 5% = **\$2,500.00**

5.4.4 Incremento en la Productividad

- **Valor estimado del incremento en productividad:** \$1,000.00 por optimización de procesos y reducción de tiempos de inactividad.

Tabla 5.6: Estimación de Ahorros Anuales con el SMCA

Tabla 5.8 Estimación de Ahorros Anuales con el SMCA	
Concepto	Ahorro Anual (USD)
Ahorro Energético	1000
Ahorro en Mantenimiento	400
Mejora en Calidad del Producto	2500
Incremento en Productividad	1000
Total Ahorros Anuales	4900

5.5 Análisis de Retorno de la Inversión (ROI)

5.5.1 Cálculo del ROI

Valores para el Cálculo:

- **Inversión Inicial:** \$8.191,27
- **Ahorros Anuales:** \$4,900.00
- **Costos Operativos Anuales:** \$289.38 (Mantenimiento) + \$250.00 (Actualizaciones) = **\$539.38**

Cálculo:

$$\text{ROI} = \left(\frac{\text{Ahorros Anuales} - \text{Costos Operativos}}{\text{Inversión Inicial}} \right) \times 100$$

$$\text{ROI} = \left(\frac{4,900.00 - 539.38}{8,191.00} \right) \times 100 = \left(\frac{4,360.62}{8,191.00} \right) \times 100 \approx 53.23\%$$

5.5.2 Período de Retorno de la Inversión (Payback Period)

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Ahorros Anuales} - \text{Costos Operativos}}$$

$$\text{Payback Period} = \frac{8,191.00}{4,360.62} \approx 1.88$$

5.6 Proyecciones a Largo Plazo

Tabla 5.9 Proyecciones de Ahorro y Costos del SMCA en 5 Años			
Año	Costos Operativos (USD)	Ahorros Anuales (USD)	Flujo Neto (USD)
1	583	4900	4317
2	583	4900	4317
3	583	4900	4317
4	583	4900	4317
5	583	4900	4317
Total	2915	24500	21585

5.8 Resumen final

El análisis económico del SMCA demuestra que, con una inversión inicial de aproximadamente **\$8,191.27**, el sistema es económicamente viable, ofreciendo un retorno de la inversión en aproximadamente **1.88 años** y un ROI del **53.23%**.

Los ahorros anuales estimados de **\$4,900.00** superan significativamente los costos operativos, generando un flujo neto positivo que contribuye a la rentabilidad y eficiencia de las operaciones.

La proyección a 5 años indica un beneficio acumulado de más de **\$21,803.10**, sin considerar posibles incrementos en los costos de energía o incentivos adicionales que podrían mejorar aún más estos resultados.

La implementación del SMCA no solo es rentable desde el punto de vista financiero, sino que también aporta mejoras significativas en la calidad del producto, optimización de procesos y contribuye a prácticas más sostenibles y eficientes en la industria.

Capítulo 6 - Estudio de Impacto Ambiental y Social

6.1 Introducción

- **Objetivo del Estudio:** Describir el propósito del análisis de impacto ambiental y social del SMCA. Establecer cómo el proyecto se alinea con los objetivos de sostenibilidad y cómo contribuye a la mejora de los procesos industriales en términos ambientales y sociales.
- **Enfoque General:** Explicar el enfoque utilizado para evaluar el impacto, basándose en indicadores de eficiencia energética, reducción de emisiones, y beneficios sociales directos e indirectos.

6.2 Impacto Ambiental

6.2.1 Evaluación del Consumo Energético

- **Reducción en el Consumo de Energía:** Explicar cómo el SMCA optimiza el consumo energético a través del control eficiente de la temperatura, humedad y los actuadores, y cómo este ahorro energético impacta en la reducción de la huella de carbono.
- **Eficiencia Energética de los Componentes:** Describir cómo los componentes seleccionados (como el ESP32, sensores de bajo consumo, baterías Li-ion, y relés de alta eficiencia) contribuyen a la reducción del uso energético y las emisiones indirectas asociadas a la generación de energía.
- **Proyección del Ahorro Energético a Largo Plazo:** Incluir un análisis del ahorro energético estimado durante la vida útil del SMCA, y cómo esto afecta al consumo total de energía y las emisiones de CO₂.

6.2.2 Disminución de Emisiones y Contaminantes

- **Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI):** Estimar la cantidad de emisiones de GEI evitadas gracias al ahorro energético. Utilizar una fórmula para calcular las emisiones reducidas en función de los kWh ahorrados y los factores de emisión locales.
- **Optimización de Recursos en Cámaras Frigoríficas:** Explicar cómo la mejora en el control de la temperatura y humedad reduce el consumo de energía en sistemas de refrigeración y calefacción, disminuyendo indirectamente las emisiones contaminantes.

6.2.3 Materiales y Sustentabilidad

- **Uso de Materiales Reciclables y Eficientes:** Evaluar la selección de materiales para la fabricación de componentes, en especial la carcasa de PETG (material reciclable) y la PCB de FR4, y cómo contribuyen a la sostenibilidad del proyecto.

- **Gestión de Residuos:** Analizar cómo el diseño modular del SMCA permite una fácil reparación y reemplazo de componentes, reduciendo el desperdicio electrónico y minimizando la necesidad de reemplazar equipos completos.

6.2.4 Ciclo de Vida del Producto

- **Análisis de Ciclo de Vida (LCA):** Describir las fases del ciclo de vida del SMCA (fabricación, operación, mantenimiento y disposición) y evaluar los impactos ambientales en cada etapa.
- **Reciclaje y Disposición Final:** Establecer el plan de disposición de los componentes al final de su vida útil, con un enfoque en el reciclaje de baterías, componentes electrónicos y materiales plásticos.

6.3 Impacto Social

6.3.1 Creación de Empleos

- **Generación de Empleo Directo e Indirecto:** Explicar cómo la fabricación, instalación y mantenimiento del SMCA genera empleos directos en el sector tecnológico y manufacturero, así como empleos indirectos relacionados con la cadena de suministro y soporte técnico.
- **Calidad del Empleo Generado:** Describir la calidad de los empleos generados, como la capacitación en tecnologías avanzadas (IoT, control embebido, energías sostenibles) y cómo estos trabajos contribuyen al desarrollo de capacidades técnicas locales.

6.3.2 Mejora en la Calidad de Vida

- **Impacto en la Industria Alimentaria:** Explicar cómo el SMCA mejora la conservación de productos alimenticios en cámaras frigoríficas, lo que reduce las pérdidas por deterioro y asegura un suministro más confiable de alimentos, beneficiando tanto a los productores como a los consumidores.
- **Beneficios para la Salud Pública:** Relacionar la mejora en el control ambiental (temperatura y humedad) con una mejor calidad de los productos almacenados, lo que puede reducir riesgos de contaminación y mejorar la salud pública al mantener estándares de calidad en alimentos perecederos.

6.3.3 Educación y Capacitación

- **Transferencia de Conocimientos:** Describir cómo el proyecto contribuye a la capacitación técnica de los operarios y técnicos involucrados, impulsando la adopción de tecnologías avanzadas en el sector industrial.
- **Proyectos Académicos y Colaboración:** Explicar cómo el desarrollo del SMCA en colaboración con instituciones académicas puede servir de plataforma para la investigación y formación de estudiantes en temas de control ambiental, energías sostenibles y tecnologías IoT.

6.4 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

- **ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante):** Describir cómo el SMCA contribuye a este ODS al optimizar el consumo energético y fomentar el uso de energías más limpias en el control ambiental de cámaras frigoríficas.
- **ODS 12 (Producción y Consumo Responsables):** Explicar cómo el SMCA reduce el desperdicio energético y mejora la eficiencia en el uso de recursos en la industria alimentaria.
- **ODS 13 (Acción por el Clima):** Relacionar el impacto del SMCA en la reducción de emisiones y su contribución a la mitigación del cambio climático.

6.5 Estrategias de Mitigación

- **Plan de Reducción de Impactos Ambientales:** Describir las estrategias implementadas para mitigar posibles impactos negativos, como la correcta disposición de los componentes electrónicos, reciclaje de baterías y optimización del consumo energético durante la operación.
- **Medidas para Maximizar el Impacto Social:** Proponer medidas para aumentar los beneficios sociales del proyecto, como la capacitación continua y la creación de redes de soporte técnico local para las industrias que adopten el SMCA.

6.6 Conclusiones del Impacto Ambiental y Social

- **Resumen de los Beneficios Ambientales:** Resumir cómo el SMCA contribuye a la sostenibilidad al reducir el consumo energético y las emisiones, y promover el uso de materiales reciclables.
- **Resumen de los Beneficios Sociales:** Destacar cómo el SMCA impulsa la creación de empleo, mejora la calidad de vida en las industrias involucradas y fortalece las capacidades técnicas locales.
- **Perspectiva Futura:** Explicar cómo el SMCA puede expandirse a otras industrias o aplicaciones, maximizando su impacto positivo tanto en el entorno como en la sociedad.

Conclusiones

El SMCA fue desarrollado para enfrentar las necesidades críticas de monitoreo y control en ambientes industriales, como cámaras frigoríficas. Entre los desafíos principales se encontraba la necesidad de lograr un control eficiente de la temperatura y la humedad en entornos industriales. El proyecto nació de la necesidad de crear una solución robusta y flexible que se pueda adaptar a diferentes tipos de aplicaciones industriales.

Para ordenar el plan de trabajo se definieron claramente los pasos a seguir para el desarrollo del SMCA, asegurando que cada fase del proyecto fuera abordada de manera sistemática y eficiente. Se eligió una metodología ágil que permitió iterar el diseño y la implementación a medida que se avanzaba en las pruebas y prototipos. Esto permitió una rápida identificación de problemas y ajustes durante las etapas iniciales del desarrollo, lo que facilitó una implementación final más sólida y acorde a los requerimientos.

El diseño del hardware fue uno de los pilares del éxito del SMCA. Se seleccionaron componentes con un equilibrio óptimo entre costo, eficiencia energética y funcionalidad. El ESP32 se destacó como el microcontrolador más adecuado debido a sus capacidades nativas de conectividad inalámbrica y su bajo consumo energético. La redundancia en la medición de temperatura y humedad fue un factor clave para garantizar la fiabilidad del sistema, mientras que los actuadores y sensores fueron seleccionados para ofrecer un control robusto sobre las condiciones ambientales.

El software desarrollado para el SMCA, basado en FreeRTOS, permitió una gestión eficiente de las tareas en tiempo real, garantizando la comunicación entre módulos y el control preciso de actuadores. El uso de una arquitectura modular permitió dividir las funciones principales del sistema en tareas independientes, lo que aumentó la escalabilidad y la facilidad de mantenimiento. Además, se integraron algoritmos de control que optimizaron el manejo de las condiciones ambientales y contribuyeron al ahorro energético.

El análisis económico del SMCA demostró que el proyecto es financieramente viable, con un retorno de inversión (ROI) estimado del 53.23% y un período de recupero de 1.88 años. Los ahorros en consumo energético y el incremento en la calidad del almacenamiento justifican la inversión inicial. Además, la estructura de costos presentada destaca que tanto el desarrollo como la fabricación del sistema pueden realizarse de manera eficiente, maximizando el impacto económico y reduciendo los costos operativos a largo plazo.

El impacto ambiental del SMCA resulta positivo, ya que el sistema optimiza el consumo energético en cámaras frigoríficas, reduciendo la huella de carbono. Los ahorros energéticos proyectados de 10,000 kWh anuales demuestran que el sistema es sostenible y puede contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de CO₂ en aplicaciones industriales. A nivel social, el SMCA mejora la seguridad y eficiencia del trabajo en plantas industriales, brindando a los operadores mejores herramientas para monitorear y controlar las condiciones en tiempo real.

El SMCA ha demostrado ser un proyecto integral que aborda con éxito los desafíos técnicos, económicos, ambientales y sociales relacionados con el control de condiciones en cámaras frigoríficas. Cada capítulo ha aportado elementos clave para la comprensión y justificación del sistema, desde el diseño del hardware y software hasta el análisis económico y ambiental. El SMCA es una solución escalable, flexible y sostenible que no solo optimiza las condiciones ambientales, sino que también contribuye a la reducción de costos operativos y al ahorro energético, mejorando la competitividad de las empresas que lo implementen. Con su modularidad y capacidad de adaptación, el SMCA tiene el potencial de expandirse a otras áreas industriales, estableciendo una base sólida para futuras innovaciones en control ambiental.

Índice de tablas

Tabla 1.1: Componentes del sistema de secado en la cámara del LIC.

Tabla 2.1: Comparación de enfoques de diseño evaluados para el SMCA.

Tabla 3.1: Comparativa técnica de microcontroladores y SBC.

Tabla 4.1: Costos de los componentes electrónicos del SMCA.

Tabla 4.2: Costos de componentes eléctricos.

Tabla 4.3: Costos de fabricación y ensamblaje de las PCBs.

Tabla 5.1: Proyecciones de ahorro y costos del SMCA en 5 años.

Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama básico del sistema inicial.

Figura 3.1: Componentes de un sistema embebido (nivel lógico).

Figura 3.3: Diagrama de contexto del SMCA.

Figura 4.1: Diseño constructivo del SMCA.

Figura 5.1: Diagrama de costo por componente.

Figura 5.2: Diagrama de costo total de desarrollo.

Figura 6.1: Impacto ambiental del SMCA.

Figura 6.2: Impacto social del SMCA

Bibliografía

- Fairchild Semiconductor. (2019). **MOC3021M Optoisolator Datasheet**. Recuperado de <https://www.fairchildsemi.com>
- NXP Semiconductors. (2019). **BT136-600 TRIAC Datasheet**. Recuperado de <https://www.nxp.com>
- Smith, J. (2020). **Power Electronics: Principles and Applications** (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Toshiba Electronics. (2018). **TLP620 Photocoupler Datasheet**. Recuperado de <https://www.toshiba-components.com>

Referencias

[1] J. Smith, *Power Electronics: Principles and Applications*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 2020.

[2] NXP Semiconductors, *BT137-600 TRIAC Datasheet*, 2019. [Online]. Available: <https://www.nxp.com>

[3] STMicroelectronics, *BT138-800 TRIAC Datasheet*, 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com>

[4] Fairchild Semiconductor, *MOC3021M Optoisolator Datasheet*, 2019. [Online]. Available: <https://www.fairchildsemi.com>

[5] Toshiba Electronics, *TLP620 Photocoupler Datasheet*, 2018. [Online]. Available: <https://www.toshiba-components.com>

[6] Songle Relay, *SRD-05VDC-SL-C Datasheet*, 2019. [Online]. Available: <https://www.songle-relay.com>

SCADA: Transparency Market Research, "SCADA Market Size, Share | Global Industry Report 2022 - 2031," *Transparency Market Research*, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://www.transparencymarketresearch.com/global-scada-market.html>. Accessed: Sep. 28, 2024(
[Transparency Market Research](https://www.transparencymarketresearch.com/global-scada-market.html)
).

BMS: Frost & Sullivan, "Building Management Systems Market – Key Growth Insights," *Frost & Sullivan Industry Report*, Feb. 2023. [Online]. Available:

<https://www.frost.com/research/building-management-systems/>. Accessed: Sep. 28, 2024(

[Grand View Research](#)

).

PLC: Mordor Intelligence, "Programmable Logic Controller Market - Growth, Trends, and Forecasts (2023 - 2028)," *Mordor Intelligence Industry Report*, May 2023. [Online]. Available:

<https://www.mordorintelligence.com/research/plc-market>. Accessed: Sep. 28, 2024(

[Research & Markets](#)

).

WSN: Allied Market Research, "Wireless Sensor Network Market by Technology and Application – Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2031," *Allied Market Research*, Jun. 2023. [Online]. Available:

<https://www.alliedmarketresearch.com/wireless-sensor-network-market>. Accessed: Sep. 28, 2024(

[Grand View Research](#)

).

ANEXO I - Planos Eléctricos

Nahuel Medina

SMCA I



PROYECTO FINAL
ING. MECATRONICA 2024



INGENIERIA MECATRONICA

Autor: Nahuel Medina

Cliente: UNER - Laboratorio de Industrias Carnicas

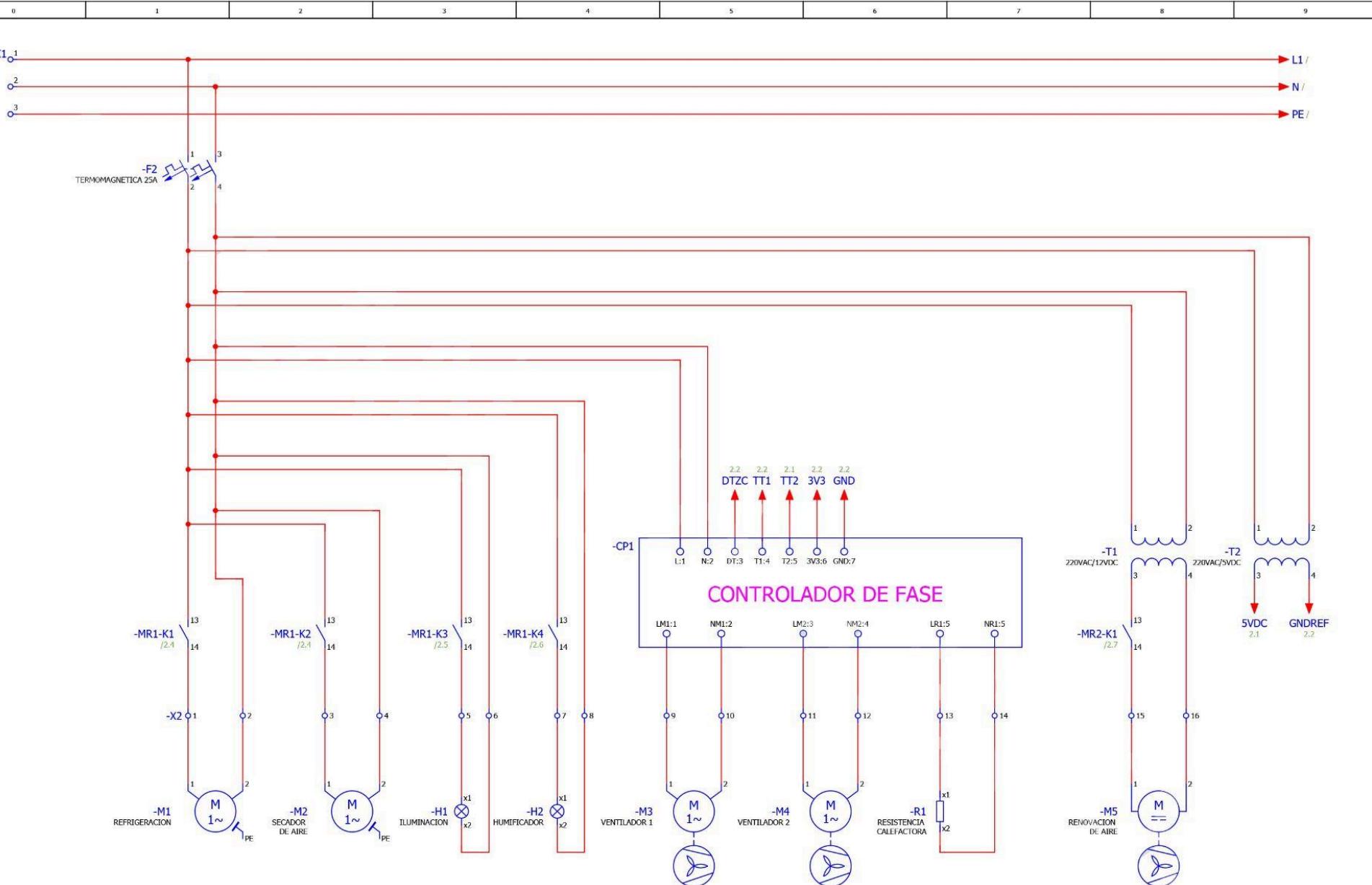
Empresa: UNER - LIC

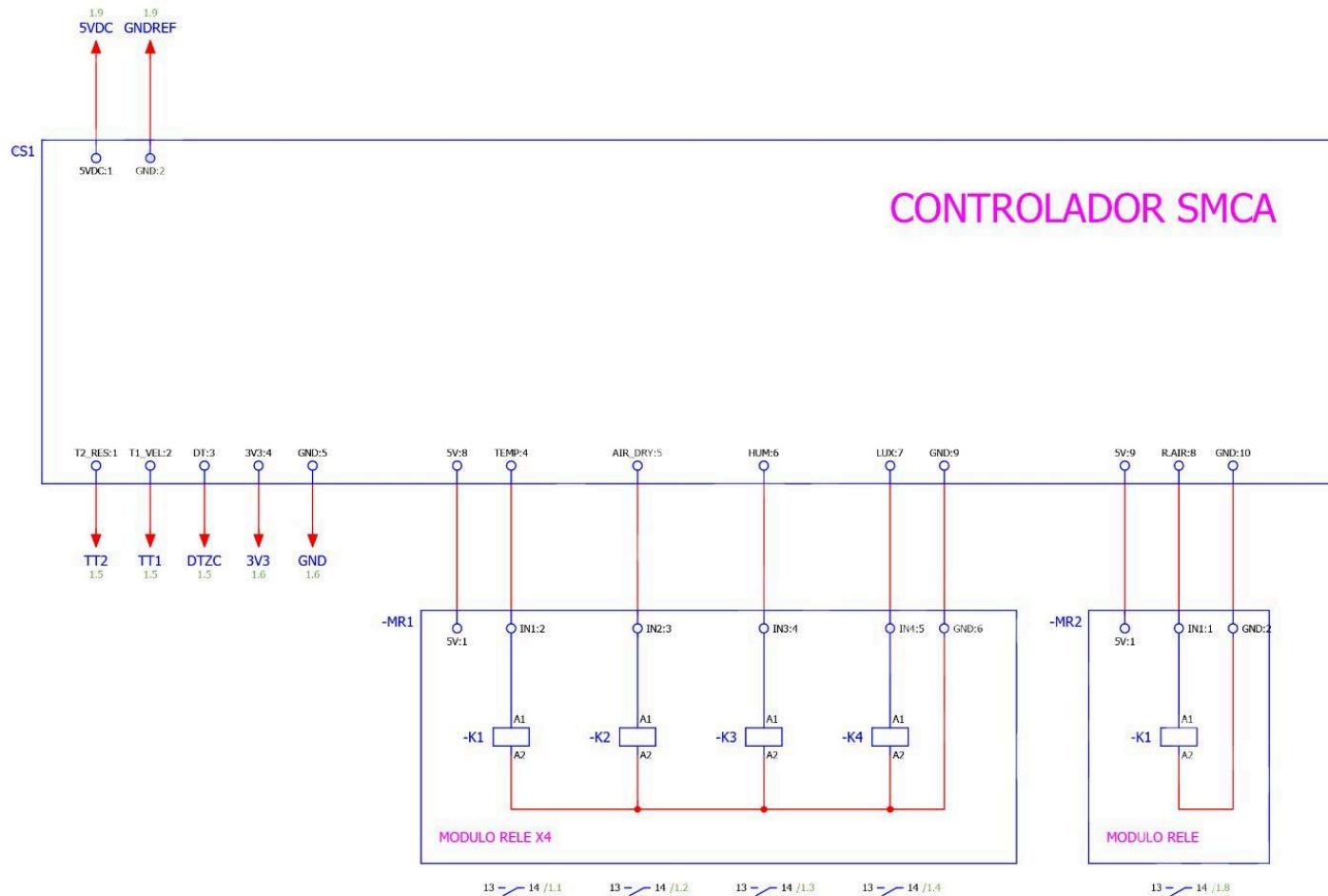
Descripcion de proyecto: Sistema Modular de Control Ambiental

Numero de proyecto: IEC_22092024

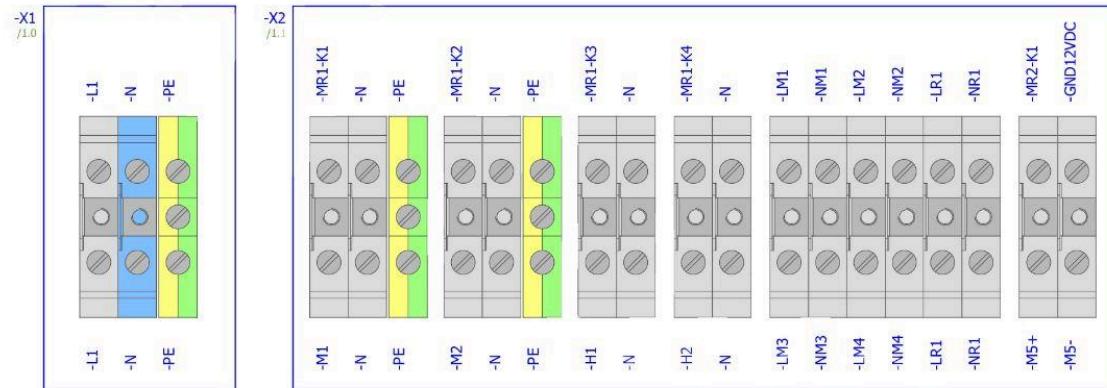
Creado: 22/09/2024

Modificado: 23/09/2024



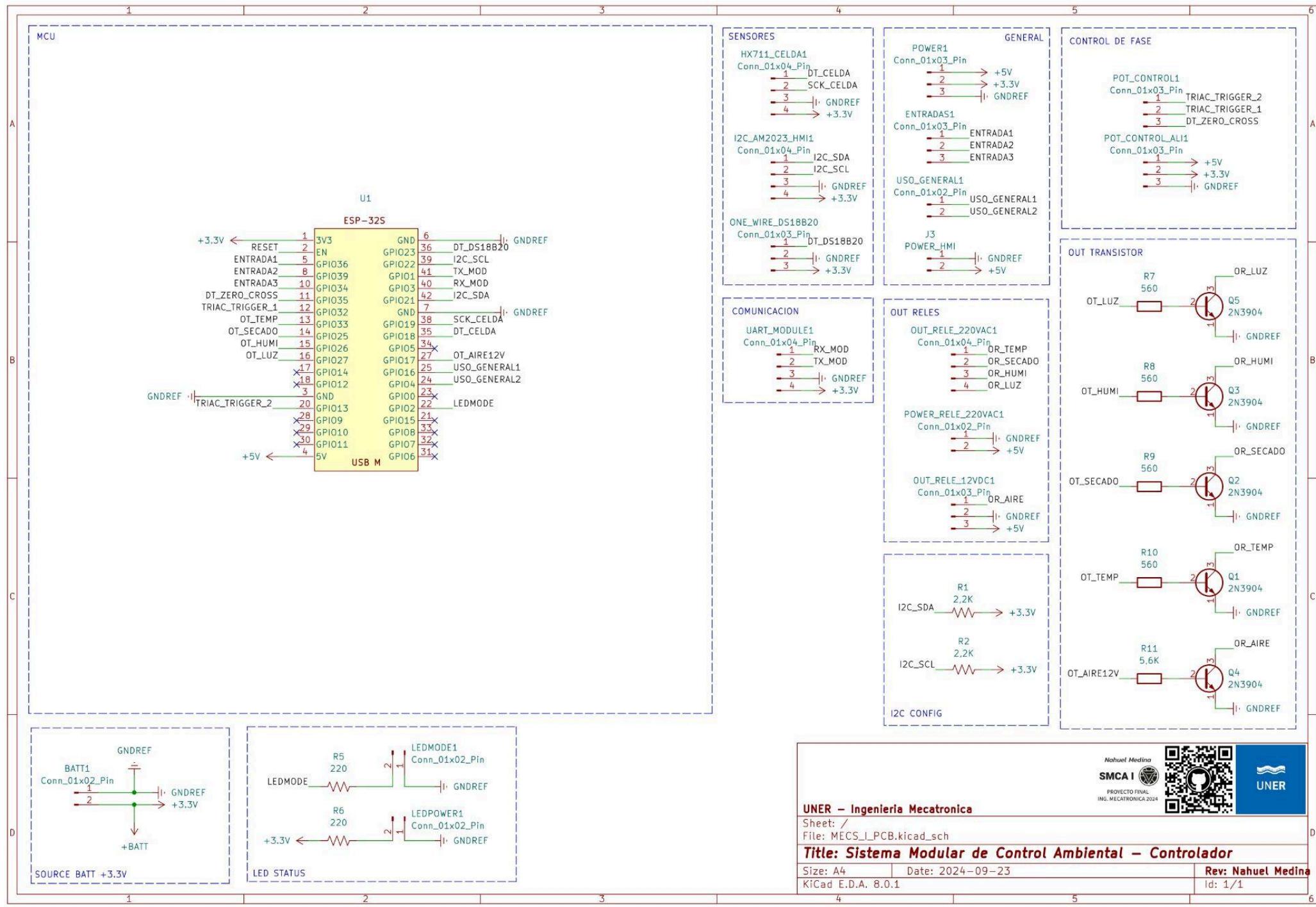


1	Fecha	23/9/2024	IEC_SMCA_22092024	UNER - Ingenieria Mecatronica	Esquema de control		= LIC
Resp.	Alexi						+
Probado			Descripción				Sistema Modular de Control Ambiental
Original		Sustitución por	Sustituido por				Hoja 2 Página 4 / 5



Fecha	23/9/2024	IEC_SMCA_22092024	UNER - Ingenieria Mecatronica	Esquema de Borneas	= LIC
Resp.	Alex				+ +
Probado		Descripcion			Sistema Modular de Control Ambiental
Original		Sustitucion por	Sustituido por		Hoja
					Página 5 / 5

ANEXO II - Esquemáticos y PCB



1 2 3 4 5 6

