

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN BAÑO TERMOSTÁTICO
DE LÍQUIDO PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS
EN RANGOS DE BAJA Y ALTA TEMPERATURA**

Trabajo de grado presentado por:

Julian Esteban Parra Flórez

Para optar al título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Tunja, Boyacá Colombia

2026

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN BAÑO TERMOSTÁTICO
DE LÍQUIDO PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS
EN RANGOS DE BAJA Y ALTA TEMPERATURA**

Trabajo de grado presentado por:

Julian Esteban Parra Flórez

Director:

M.Sc. Cristian David Parra Camacho

Codirector:

Ph.D. William Fabián Chaparro Becerra

Director empresa

Lina Fernanda Rojas Quintero

Tunja, Boyacá Colombia
2026

Dedicatoria

- A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas y el apoyo constante que me brindaron durante cada etapa de mi formación personal y profesional. Gracias por ser el principal motor de mis esfuerzos y por enseñarme el valor de la disciplina y la perseverancia.
- A mi familia, por su compañía y confianza a lo largo de este proceso. Su apoyo fue indispensable para superar los desafíos presentados durante el desarrollo de este proyecto y mi carrera.
- A mis docentes, quienes compartieron sus conocimientos, experiencia y orientación a lo largo de mi formación académica, su dedicación y compromiso influenciaron enormemente mi crecimiento profesional y la culminación de este trabajo.

Índice general

1	Introducción	11
1.1	Planteamiento del problema	12
1.2	Formulación de Pregunta	12
1.3	Justificación	12
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo General	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	Marco teórico	15
3.1	Metrología de temperatura y trazabilidad	15
3.1.1	Conceptos de Trazabilidad y Estándares Internacionales	15
3.1.2	Incertidumbre, Estabilidad y Uniformidad	15
3.2	Transferencia de calor y sistemas termostáticos	16
3.2.1	Leyes Fundamentales y Balance Energético	17
3.2.2	Convección Forzada y Número de Nusselt	17
3.3	Refrigeración por compresión y calefacción eléctrica	18
3.3.1	Generación de Calor (Efecto Joule)	18
3.3.2	Circuitos de Refrigeración por Compresión	19
3.4	Control térmico (ON/OFF con histéresis)	20
3.4.1	Dinámica del Control de Dos Posiciones	20
3.4.2	Mecanismo de Histéresis (Brecha Diferencial)	20
3.5	Tipos de sensores de temperatura	21
3.5.1	RTD (Pt100)	21
3.5.2	Termistores (NTC)	22
3.5.3	Termopares	22
3.6	Sistema de circulación del fluido	22
3.6.1	Circulación y Homogeneidad	23
3.6.2	Calor de Fricción	23
3.7	Control y comunicación con microcontrolador e interfaz gráfica de usuario (GUI)	24
3.7.1	Sistemas Digitales y Compensación	24
3.7.2	Interfaz de Usuario (GUI) y Conectividad Inalámbrica	24
3.8	ISO/IEC 17025 y diseño de equipos para calibración	25
3.8.1	Requisitos de Recursos	25
3.8.2	Control de Datos	25
4	Metodología	26
4.1	Fase 1: Análisis metrológico y especificación de requerimientos	27

4.2	Fase 2: Diseño térmico y selección de subsistemas energéticos	28
4.3	Fase 3: Diseño del sistema de medición y control digital	29
4.4	Fase 4: Integración del prototipo	31
4.5	Fase 5: Evaluación experimental y validación del desempeño	31
4.5.1	Parámetros metrológicos evaluados	31
5	Diseño e implementación	34
5.1	Arquitectura del sistema	34
5.1.1	Arquitectura general	34
5.1.2	Sistema térmico	35
5.1.3	Sistema de recirculación	35
5.1.4	Sistema de medición	35
5.1.5	Sistema electrónico y de control	35
5.1.6	Interfaz de usuario	36
5.1.7	Sistema de seguridad	36
5.2	Selección de componentes	36
5.2.1	Unidad de procesamiento y control	36
5.2.2	Sensores	37
5.2.3	Módulos de comunicación y acondicionamiento	38
5.2.4	Módulos de interacción	40
5.2.5	Módulos de alimentación	41
5.2.6	Líquido refrigerante	42
5.2.7	Actuadores y cargas	43
5.3	Diseño del sistema electrónico	45
5.3.1	Diseño del circuito esquemático	45
5.3.2	Etapa de accionamiento y control de cargas	46
5.3.3	Etapa de adquisición de temperatura	46
5.3.4	Sistema de protección eléctrica	47
5.4	Implementación y prototipado	48
5.4.1	Implementación en protoboard	48
5.4.2	Validación de subsistemas	53
5.4.3	Ensamble preliminar del sistema	56
5.5	Desarrollo del sistema de control	60
5.5.1	Estrategia de control ON/OFF con histéresis	60
5.5.2	Control de calentamiento	61
5.5.3	Control de refrigeración	63
5.5.4	Control de recirculación	64
5.5.5	Lógica general de funcionamiento	66
5.6	Sistema de medición	67
5.6.1	Implementación del Pt100	67
5.6.2	Comparación con termómetro patrón Fluke	70
5.6.2.1	Evaluación estadística de la correspondencia entre las mediciones	70
5.6.3	Ajuste y corrección de medición	72
5.7	Desarrollo de la interfaz de usuario	72
5.7.1	Interfaz local LCD y teclado matricial	72
5.7.2	Desarrollo de la GUI	72
5.7.3	Comunicación entre GUI y ESP32	74

5.7.3.1	Comunicación Serial	74
5.7.3.2	Comunicación Wi-Fi	74
5.7.3.3	Comunicación Bluetooth	75
5.8	Diseño e implementación de la PCB	76
5.8.1	Diseño y fabricación del PCB	77
5.8.2	Ensamble y soldadura	78
5.9	Integración y pruebas de funcionamiento	79
6	Resultados y validación	82
6.1	Integración del sistema	82
6.2	Validación del sistema de medición	83
6.2.1	Comparación del Pt100 con el termómetro patrón	83
6.2.2	Uniformidad térmica del baño	84
6.2.3	Estabilidad de lectura y filtrado digital	85
6.3	Pruebas de calentamiento	87
6.3.1	Metodología	87
6.3.2	Resultados	88
6.3.3	Análisis	88
6.4	Pruebas de refrigeración y congelación	88
6.4.1	Resultados	88
6.4.2	Análisis	89
6.5	Validación del control térmico	89
6.5.1	Estimación experimental de incertidumbre	90
	Conclusiones	93
	Referencias	95

Índice de figuras

Figura 3.3.1	Esquema básico del ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizado para la extracción de calor en sistemas termostáticos.	19
Figura 3.4.1	Gráfico que muestra el comportamiento de un termostato con histéresis	21
Figura 3.6.1	Ejemplo de sistema de circulación de fluido	23
Figura 4.0.1	Esquema de las 5 de fases de la metodología	26
Figura 5.2.1	Microcontrolador ESP32 utilizado en el proyecto	37
Figura 5.2.2	Pt100 Tipo A de 3 hilos	38
Figura 5.2.3	Termistor NTC de 10 k Ω	38
Figura 5.2.4	Módulo MAX31865 utilizado para leer el valor de la Pt100	39
Figura 5.2.5	Módulo CP2102 para transmisión de datos	39
Figura 5.2.6	Módulo I2C para LCD	40
Figura 5.2.7	LCD 20x4 para visualización de menus	40
Figura 5.2.8	Teclado matricial 4x4 para la interactuar con el menu	41
Figura 5.2.9	Buzzer activo de 5v	41
Figura 5.2.10	Fuente conmutada 12V a 10A 120W	42
Figura 5.2.11	Módulo reductor de voltaje DC-DC	42
Figura 5.2.12	Líquido refrigerante etilenglicol 100 % inhibido	43
Figura 5.2.13	Relé de estado solido SSR a 25A	43
Figura 5.2.14	Compresor Samsung MK162C L1U	44
Figura 5.2.15	Resistencia dispensador de agua caliente	44
Figura 5.2.16	Bomba peristaltica Kamoer KPHM600-12B3B1	45
Figura 5.3.1	Esquema de conexión módulo MAX31865 con Pt100	47
Figura 5.4.1	Módulo MAX3165 adaptado a Pt100 de 3 hilos, los circulos rojo y verde indican las zonas donde se modificó	48
Figura 5.4.2	Valor de temperatura corporal mostrado en pantalla OLED	49
Figura 5.4.3	Diagrama que muestra el flujo general de navegación entre menús.	49
Figura 5.4.4	Relés de estado solido conectados	50
Figura 5.4.5	Bomba peristaltica conectada a mangueras	51
Figura 5.4.6	Simulacion del circuito convertidor de nivel logico en multisim.	51
Figura 5.4.7	Circuito divisor de voltaje con NTC realizado en multisim	52
Figura 5.4.8	A la izquierda el termometro UT320D, y a la izquierda la LCD mostrando el valor de temperatura	53
Figura 5.4.9	Estado inicial del gabinete con el sistema de compresión instalado.	54
Figura 5.4.10	Serpentín de cobre alrededor de la pared interna del recipiente, permite contacto directo con el líquido.	55
Figura 5.4.11	Termómetro de prueba mostrando temperatura del agua congelada a -18,5 °C	55

Figura 5.4.12	Resistencia instalada previamente debajo del recipiente.	56
Figura 5.4.13	El antes y el después de aplicar recubrimiento en el tanque.	57
Figura 5.4.14	Distribución de entradas, salidas y partes esenciales de la resistencia.	57
Figura 5.4.15	A la izquierda se ve la manguera que conecta la entrada de líquido de la resistencia con el recipiente, a la derecha se ve el drenaje por el cual el líquido es bombeado.	58
Figura 5.4.16	En color rojo se señala la manguera mediante la cual el líquido sale del recipiente, mientras que en color verde se indica la manguera de retorno del líquido hacia el tanque.	59
Figura 5.4.17	Sistema completo que integra el circuito electrónico con el sistema térmico.	60
Figura 5.5.1	Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM alto.	62
Figura 5.5.2	Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM bajo.	62
Figura 5.5.3	Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM variable de acuerdo con la diferencia de temperatura.	63
Figura 5.5.4	Sistema de circulación integrado y funcional.	64
Figura 5.5.5	Líquido siendo retornado al recipiente mediante bombeo.	65
Figura 5.5.6	Sistema de circulación aislado para evitar condensacion y perdidas térmicas.	66
Figura 5.6.1	Tapa impresa en 3D adaptada para colocar sondas de termómetros.	67
Figura 5.6.2	Longitud de tubo impreso en 3D, mostrada con una regla.	68
Figura 5.6.3	Imagen que muestra las medidas del recipiente y la altura del liquido con respecto a este.	69
Figura 5.6.4	Correspondencia entre las mediciones del sistema desarrollado y las obtenidas mediante el termómetro patrón Fluke 52. La línea de tendencia representa el ajuste por regresión lineal realizado sobre los datos experimentales obtenidos durante la validación del sistema.	71
Figura 5.7.1	Pantalla principal de monitoreo de la GUI.	73
Figura 5.7.2	Pantalla de selección de metodo de conexión.	73
Figura 5.7.3	Pantalla de configuración de parametros de red.	74
Figura 5.7.4	Pantalla LCD que muestra la cantidad de IPs almacenadas en la memoria de la ESP.	75
Figura 5.7.5	Pantalla LCD que muestra la conexión satisfactoria con el cliente vía Wi-Fi.	75
Figura 5.7.6	Dispositivo ThermoBathCS emparejado al PC.	76
Figura 5.8.1	Diseño del circuito en proteus antes de diseñar la PCB, esto se realiza para identificar componentes y entradas.	77
Figura 5.8.2	Diseño de la PCB en Proteus.	77
Figura 5.8.3	Cara superior de la PCB.	78
Figura 5.8.4	Cara inferior de la PCB.	78
Figura 5.8.5	Imagen de la PCB con la soldadura ya realizada.	79
Figura 5.8.6	PCB completamente ensamblado, con todos los módulos y conexiones implementados.	79
Figura 5.9.1	PCB y componentes conectados dentro de la carcasa.	80
Figura 5.9.2	Ensamble final del proyecto.	80

Figura 5.9.3	Fotografía de visualización de datos en GUI.	81
Figura 6.2.1	Diagrama que muestra las posiciones en que se coloca el termómetro fluke para medir uniformidad.	84
Figura 6.2.2	Comparación entre la señal original y la señal filtrada mediante filtro digital exponencial.	86
Figura 6.4.1	Termómetros ubicados dentro del baño termostático para evaluar temperatura.	89

Índice de tablas

Tabla 5.6.1 Resultados de la comparación con termómetro Fluke y Pt100 en distintos puntos de temperatura.	70
Tabla 6.2.1 Desempeño térmico experimental del sistema	83
Tabla 6.2.2 Evaluación experimental de uniformidad térmica a 8 °C	85
Tabla 6.2.3 Variación térmica del sistema en estado estable	87
Tabla 6.5.1 Contribuciones consideradas en la estimación experimental de incertidumbre	90

Resumen

En el campo de la biomédica la calibración de equipos es indispensable al garantizar la fiabilidad de los equipos médicos, ya que dicho proceso implica verificar y regular la precisión de estos, de esta forma asegurando que los valores obtenidos sean lo más acordes a la realidad y permitan brindar a los pacientes diagnósticos correctos y tratamientos seguros. Actualmente Clinical Solutions SAS no posee un medio con el cual pueda realizar la calibración precisa de termómetros, principalmente cuando se requiere alcanzar temperaturas de menos de 0 °C o temperaturas altas y estables, debido a esto la finalidad de este proyecto se enfoca en proporcionar a la empresa un medio con el cual realizar la calibración precisa de termómetros a bajas y altas temperaturas de forma sencilla e intuitiva haciendo uso de equipos patrones para la medición de temperatura.

Este proyecto se enfoca en diseñar, programar y poner en funcionamiento un baño termostático de baja y alta temperatura para la calibración termómetros, para alcanzar los rangos deseados de se hace uso de un sistema de compresión y un dispositivo de calentamiento, esto siendo gestionado mediante el uso de un microcontrolador, el cual además permite la conexión, monitoreo y control de la bañera termostática de forma alámbrica. Se prevé que el proyecto ofrezca alta precisión y cumpla con los estándares mínimos para la calibración de termómetros, manteniendo la estabilidad en la temperatura solicitada por el usuario a la vez que brindando datos útiles y fiables para su uso en la calibración.

Palabras Clave: Calibración de termómetros, Baño termostático, Precisión, Estabilidad térmica, Microcontrolador, Sistema de compresión, Equipos patrones

Abstract

In the field of biomedicine, equipment calibration is essential to guarantee the reliability of medical devices. This process involves verifying and regulating their accuracy, ensuring that the values obtained are as close to reality as possible and allowing for correct diagnoses and safe treatments for patients. Currently, Clinical Solutions SAS lacks a means to perform precise thermometer calibration, especially when temperatures below 0 °C or high and stable temperatures are required. Therefore, the purpose of this project is to provide the company with a simple and intuitive way to perform precise calibration of thermometers at both low and high temperatures using standard temperature measurement equipment.

This project focuses on designing, programming, and implementing a low- and high-temperature thermostatic bath for thermometer calibration. To achieve the desired temperature ranges, a compression system and a heating device are used, all managed by a microcontroller. The microcontroller also allows for wired connection, monitoring, and control of the thermostatic bath. The project is expected to offer high precision and meet the minimum standards for thermometer calibration, maintaining stability at the user-requested temperature while providing useful and reliable data for calibration purposes.

Capítulo 1

Introducción

La medición precisa de la temperatura constituye un factor fundamental en los ámbitos científico, industrial y sanitario, ya que la confiabilidad de los datos incide directamente en la seguridad de los procesos, la conservación de productos y la validez de los resultados técnicos. Para asegurar la exactitud de los instrumentos de medición térmica, resulta imprescindible evaluarlos en condiciones controladas que permitan comparar su desempeño con valores de referencia en entornos estables y reproducibles.

En este contexto, los sistemas que generan medios térmicos uniformes y regulados adquieren relevancia significativa, pues proporcionan las condiciones necesarias para verificar el desempeño de los dispositivos de medición. La estabilidad, la homogeneidad térmica y la capacidad de control constituyen elementos esenciales para garantizar la calidad y la consistencia en estos procesos. Los baños térmicos representan una de las soluciones más utilizadas para este propósito, debido a su capacidad para mantener temperaturas constantes durante periodos prolongados y proporcionar una adecuada transferencia térmica hacia los instrumentos sometidos a evaluación. Dependiendo de sus características de diseño, estos sistemas pueden emplearse en procesos de calibración, verificación, ensayo y validación de sensores térmicos utilizados en laboratorios, equipos biomédicos y aplicaciones industriales.

A pesar de las ventajas que ofrecen estos sistemas, muchos equipos comerciales presentan costos elevados, especialmente aquellos capaces de operar en amplios rangos de temperatura y mantener altos niveles de estabilidad térmica. Esta situación limita su accesibilidad en entornos académicos, laboratorios pequeños y proyectos de investigación con recursos reducidos. Debido a ello, surge la necesidad de desarrollar alternativas funcionales que permitan implementar sistemas térmicos controlados utilizando componentes electrónicos y mecánicos de fácil adquisición, manteniendo al mismo tiempo un desempeño adecuado para aplicaciones experimentales y de verificación.

El desarrollo de un baño térmico implica la integración de diferentes subsistemas electrónicos, térmicos y de control, los cuales deben operar de manera coordinada para garantizar estabilidad y uniformidad en la temperatura del fluido de trabajo. Entre los principales desafíos se encuentran la adquisición precisa de temperatura, el control adecuado de sistemas de calefacción y refrigeración, la circulación homogénea del fluido y la protección de elementos de potencia como resistencias y compresores, por esto, es que resulta importante implementar estrategias de control que reduzcan oscilaciones

térmicas y permitan una operación segura y estable bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

1.1. Planteamiento del problema

En laboratorios, clínicas y hospitales se hace uso extendido de refrigeradores para el almacenamiento de distintos tipos de productos o insumos, tales como; vacunas, muestras biológicas de pacientes, antibióticos, derivados sanguíneos, ampollas, entre otros. Es de suma importancia el mantener la temperatura de las muestras en los rangos que requieren, ya que el desviarse de esta puede producir deterioro o pérdida total del insumo, causando pérdidas económicas y, en los peores casos, puede poner la vida de un paciente en riesgo al suministrar medicamentos que hayan perdido sus propiedades o retrasando o afectando análisis de muestras en pacientes. Para monitorear la temperatura a la que se encuentran los refrigeradores se hace uso de termómetros, los cuales muestran la temperatura a la que se encuentra un entorno en tiempo real haciendo uso de sensores internos o de sondas externas, sin embargo, debido a factores como el uso continuo, desgaste de componentes, variaciones ambientales y la falta de mantenimiento, con el pasar del tiempo tienden a desajustarse.

Clinical Solutions SAS busca ampliar y fortalecer la calidad de los servicios que ofrece a sus clientes, entre los cuales se encuentra la calibración de termómetros, esto se realiza sumergiendo un termómetro patrón con certificado de calibración y el termómetro a calibrar, ambos en un medio el cual mantenga una temperatura estable y constante, se comparan los resultados y en base a eso se determina si el equipo está desajustado. La empresa actualmente no dispone del equipo necesario para generar y controlar de manera estable la temperatura, por lo que el proceso de calibración no puede realizarse. Sumado a lo anterior, los baños termostáticos actuales que se usan para medir temperaturas altas y bajas pueden tener precios de entre 1000 y 1500 dólares, que además no cuentan con software para control y monitoreo a distancia.

1.2. Formulación de Pregunta

¿Cómo diseñar y evaluar un baño termostático de control automático, de bajo costo y con capacidad de monitoreo remoto, que garantice precisión, estabilidad térmica y uniformidad en cierto rango de temperatura específico, para la calibración de termómetros en laboratorios y clínicas?

1.3. Justificación

El proyecto permitirá a Clinical Solutions SAS el disponer de un medio térmico estable, controlado y homogéneo que garantice la obtención de resultados confiables durante los procesos de verificación y calibración de termómetros utilizados en equipos de refrigeración. La implementación de este baño termostático representa una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible frente a equipos comerciales de alto costo, permitiendo a la empresa fortalecer sus capacidades internas de

calibración y mejorar la calidad de los servicios ofrecidos a sus clientes.

La originalidad del proyecto radica en el diseño e implementación de un sistema ajustado específicamente a las necesidades operativas de la empresa, integrando mecanismos de control térmico, recirculación de fluido, adquisición de datos y monitoreo de variables que permiten mantener condiciones estables de operación. Adicionalmente, el sistema incorpora herramientas de comunicación e interacción con el usuario que facilitan el seguimiento de parámetros y el control del proceso de manera sencilla e intuitiva, contribuyendo a mejorar la experiencia operativa y la confiabilidad de las mediciones realizadas.

De igual manera, el proyecto genera un impacto significativo sobre la calidad y competitividad de los servicios prestados por la empresa, ya que permitirá disponer de un medio de comparación entre los equipos recibidos y los instrumentos patrón pertenecientes al laboratorio, optimizando tiempos de respuesta, reduciendo costos operativos y fortaleciendo el cumplimiento de estándares técnicos y normativos asociados a los procesos de calibración y aseguramiento metrológico.

Además del aporte tecnológico realizado a la empresa, este trabajo aplica práctica de conocimientos adquiridos durante el proceso de formación académica en un entorno real de necesidades industriales, integrando áreas relacionadas con la automatización, la instrumentación electrónica, el control de procesos, la metrología y la adquisición de datos, evidenciando la importancia de la investigación aplicada y la transferencia de conocimiento como herramientas para la solución de problemáticas presentes en el entorno empresarial.

En este sentido, el proyecto se enmarca dentro de las líneas de trabajo asociadas al desarrollo tecnológico, automatización e instrumentación, promoviendo la creación de soluciones funcionales orientadas a mejorar procesos industriales y de laboratorio mediante el uso de tecnologías accesibles, sistemas de control y estrategias de medición confiables, lo que también contribuye al fortalecimiento de competencias profesionales relacionadas con el diseño, implementación y validación de sistemas electrónicos aplicados al control térmico y aseguramiento metrológico.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Elaborar un baño termostático de líquido con control automático que permita la verificación y calibración de termómetros con un rango de temperatura desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, garantizando precisión, estabilidad térmica y facilidad de operación.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir los requerimientos necesarios para un baño termostático de líquido destinado a funcionar como medio para la calibración de termómetros, así como los parámetros electrónicos necesarios para el diseño del sistema de control y regulación térmica requeridos por la empresa.
- Diseñar un prototipo de baño termostático que permita mantener temperaturas estables dentro de un rango definido con precisión.
- Evaluar el desempeño del baño termostático ensamblado, validando su capacidad y funcionamiento haciendo uso de equipos patrón destinados a la calibración.

Capítulo 3

Marco teórico

El diseño de un baño termostático orientado a procesos de calibración de temperatura requiere la integración de fundamentos de metrología, transferencia de calor y control térmico. Estos elementos permiten establecer las condiciones necesarias para garantizar trazabilidad, estabilidad y uniformidad en el entorno térmico, asegurando que las mediciones realizadas sean confiables y comparables con estándares internacionales. En este capítulo se desarrollan los principios teóricos que sustentan el comportamiento del sistema propuesto, conectando los fenómenos físicos con los requerimientos metrológicos y las decisiones de diseño implementadas.

3.1. Metrología de temperatura y trazabilidad

3.1.1. Conceptos de Trazabilidad y Estándares Internacionales

La trazabilidad metrológica se define como la propiedad de un resultado de medida que permite relacionarlo con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, donde cada eslabón contribuye a la incertidumbre de medición (ISO17025, 2017). En termometría, la referencia fundamental es la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), la cual establece puntos fijos basados en estados de equilibrio térmico de sustancias puras y métodos de interpolación para rangos intermedios (European Accreditation, 2022; Nordtest, 1994).

El baño termostático constituye el medio físico que permite materializar la trazabilidad mediante el método de calibración por comparación, en el cual el termómetro bajo prueba y un instrumento patrón se someten a condiciones térmicas idénticas (Nordtest, 1994). Para que este proceso sea válido, el sistema debe garantizar un entorno térmico controlado, donde las variaciones espaciales y temporales de temperatura sean mínimas, evitando la introducción de errores adicionales que comprometan la transferencia de trazabilidad.

3.1.2. Incertidumbre, Estabilidad y Uniformidad

La incertidumbre de medición representa la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos a una magnitud medida, considerando las fuentes de error asociadas al instrumento, al método y a las condiciones ambientales (Aranda & Merlone, 2023). En sistemas térmicos destinados a calibración, esta incertidumbre está fuertemente influenciada por el comportamiento del medio en el cual se realiza la medición,

particularmente por su estabilidad y uniformidad térmica. La estabilidad térmica se refiere a la capacidad del sistema de mantener una temperatura constante en el tiempo una vez alcanzado el equilibrio, y puede cuantificarse mediante la diferencia entre los valores máximo y mínimo registrados en un intervalo determinado, como se muestra en la ecuación (3.1.1).

$$\Delta T = T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}} \quad (3.1.1)$$

Donde:

ΔT corresponde a la variación de temperatura o estabilidad térmica del sistema [°C].

$T_{\text{máx}}$ representa la temperatura máxima registrada durante el intervalo de medición [°C].

$T_{\text{mín}}$ representa la temperatura mínima registrada durante el mismo intervalo [°C].

Por otra parte, la uniformidad térmica corresponde a la distribución espacial de la temperatura dentro del volumen de trabajo, donde la presencia de gradientes térmicos puede generar discrepancias entre el valor medido por el patrón y el instrumento bajo prueba. Adicionalmente, el efecto de inmersión constituye una fuente de error relevante, ya que el intercambio de calor entre el sensor y el ambiente externo puede alterar la medición si no se garantiza una profundidad adecuada de inserción, recomendándose valores mínimos de 100 mm en líquidos (Nordtest, 1994). La uniformidad térmica puede evaluarse mediante la dispersión de las temperaturas medidas respecto a un valor de referencia dentro del volumen útil del baño termostático. Esta relación se expresa en la ecuación (3.1.2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2} \quad (3.1.2)$$

Donde:

σ corresponde a la desviación estándar de las temperaturas medidas [°C].

n representa la cantidad total de mediciones realizadas.

T_i corresponde a cada temperatura medida dentro del volumen de trabajo [°C].

T_0 representa la temperatura de referencia o temperatura promedio [°C].

3.2. Transferencia de calor y sistemas termostáticos

La transferencia de calor es el fundamento físico que define la conducta térmica del baño termostático, pues regula los procedimientos a través de los cuales el sistema intercambia energía con el medio ambiente y reparte la temperatura en el fluido. La evaluación de los mecanismos de conducción y convección posibilita entender y modelar fenómenos como la formación de gradientes térmicos, las pérdidas de calor y la dinámica estabilizadora, que afectan directamente a la estabilidad y uniformidad del sistema. Estos son factores fundamentales en el calibrado.

3.2.1. Leyes Fundamentales y Balance Energético

La Primera Ley de la Termodinámica, que dice que la energía se conserva dentro de un sistema, regula el comportamiento térmico de un baño termostático. Esta ley establece que el cambio en la energía interna corresponde a la diferencia entre el calor neto transferido y el trabajo realizado (Cengel, 2002).. En este marco, el balance energético permite evaluar la habilidad del sistema de llegar y sostener una temperatura específica, teniendo en cuenta tanto la energía proporcionada como las pérdidas hacia el ambiente. La transferencia de calor en el sistema se produce fundamentalmente a través de la conducción y la convección. La primera es el proceso por el que el calor se disipa a través del aislamiento y las paredes del contenedor, según lo describe la Ley de Fourier, mostrada en la ecuación (3.2.1).

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.2.1)$$

Donde:

Q representa la tasa de transferencia de calor por conducción [W].

k corresponde a la conductividad térmica del material [W/m·K].

A es el área transversal a través de la cual se transfiere el calor [m²].

$\frac{dT}{dx}$ representa el gradiente de temperatura respecto a la distancia [K/m].

En cuanto a la convección, es el método predominante en fluidos y explica cómo se transfiere el calor entre el líquido y las superficies que están en contacto. El coeficiente de convección se basa en la corriente del fluido. Estos procedimientos determinan cuán eficaz es el sistema en mantener condiciones térmicas controladas, y para ello es esencial reducir al mínimo las pérdidas por conducción utilizando aislamiento térmico y aumentar la transferencia convectiva dentro del fluido.

3.2.2. Convección Forzada y Número de Nusselt

La circulación forzada es uno de los métodos más relevantes para optimizar la homogeneidad térmica en el volumen de trabajo, cuando se trata de sistemas termostáticos líquidos. La convección forzada, en contraste con la natural, utiliza un sistema de agitación mecánica o bombeo para aumentar el movimiento del líquido y facilitar la transferencia térmica. En el caso de la convección natural, el desplazamiento del fluido se basa solamente en las variaciones de densidad provocadas por la temperatura. Este fenómeno genera un incremento notable del número de Nusselt, que es un parámetro adimensional que establece una relación entre la transferencia de calor por convección y la puramente conductiva, elevando de esta manera el coeficiente convectivo de transferencia de calor h (Cengel, 2002). Esto es definido en la ecuación (3.2.2).

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.2.2)$$

Donde:

Nu es el número de Nusselt.

h corresponde al coeficiente convectivo de transferencia de calor [W/m²·K].

L representa la longitud característica del sistema [m].

k es la conductividad térmica del fluido [W/m·K].

Acelerar la creación del equilibrio térmico en el baño y disminuir los gradientes térmicos internos es posible gracias al aumento del coeficiente convectivo. Este comportamiento es particularmente relevante en las aplicaciones metrológicas, porque garantiza que el instrumento bajo calibración y el termómetro patrón estén expuestos a condiciones térmicas similares dentro del fluido. Así, la circulación mecánica no solo optimiza la estabilidad y uniformidad del sistema, sino que además ayuda de manera directa a reducir los errores vinculados a las fluctuaciones espaciales de temperatura en los procesos de calibración (Nordtest, 1994).

3.3. Refrigeración por compresión y calefacción eléctrica

Para que un baño termostático opere en un amplio rango de temperatura, es fundamental incorporar sistemas capaces de suministrar y extraer energía térmica del fluido de trabajo. La calefacción eléctrica se refiere al procedimiento de elevar la temperatura convirtiendo energía eléctrica en calor, mientras que la refrigeración por compresión es el método para lograr temperaturas inferiores a las ambientales a través de un continuo desalojo de calor hacia el exterior. Para comprender el comportamiento energético del sistema, la habilidad de respuesta térmica y los requerimientos para mantener la estabilidad y homogeneidad durante los procesos de calibración, es fundamental analizar las dos herramientas.

3.3.1. Generación de Calor (Efecto Joule)

El efecto Joule es el fenómeno físico que permite la conversión de energía eléctrica en térmica cuando una corriente pasa por un material resistivo; así, se produce calor en el sistema. En los elementos calefactores eléctricos, la disipación térmica está determinada por la corriente que pasa a través de la resistencia y el valor resistivo del material, lo que se puede expresar con la ecuación (3.3.1).

$$P = I^2 R \quad (3.3.1)$$

Donde:

P corresponde a la potencia térmica generada [W].

I representa la corriente eléctrica que circula por el elemento calefactor [A].

R corresponde a la resistencia eléctrica del material [Ω].

Este principio es el fundamento del sistema de calentamiento del baño termostático, dado que posibilita la transferencia controlada de energía al fluido de trabajo hasta llegar a la temperatura establecida.

Se debe dimensionar la potencia del sistema de calefacción teniendo en cuenta no solo el calentamiento del volumen de fluido que hay en el baño, sino también las pérdidas térmicas vinculadas con procesos de conducción y convección hacia los alrededores. Por lo tanto, la habilidad del elemento calefactor tiene un impacto directo en la capacidad del sistema de sostener temperaturas altas con estabilidad, la velocidad de respuesta térmica y el tiempo que tarda en estabilizarse. Para llegar a temperaturas próximas a los 70 °C,

el sistema tiene que proveer suficiente energía para contrarrestar de manera continua las pérdidas de calor que ocurren en las paredes, tuberías y superficie del baño expuesta, asegurando así que se den las condiciones térmicas apropiadas para calibración (Cengel, 2002).

3.3.2. Circuitos de Refrigeración por Compresión

El sistema utiliza un ciclo de refrigeración por compresión de vapor para llegar a temperaturas más bajas que las ambientales; este es un método muy usado en aplicaciones industriales de refrigeración y control térmico. En este proceso, el refrigerante fluye de manera constante a través de un circuito cerrado que está formado sobre todo por compresor, condensador, dispositivo de expansión y evaporador. El refrigerante tiene la capacidad de captar calor del fluido del baño en el evaporador y liberarlo después al entorno en el condensador, lo que posibilita que se extraiga energía térmica del sistema hasta que las temperaturas se aproximen a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cengel, 2002). En la siguiente imagen se muestran los principales componentes que conforman el ciclo de refrigeración por compresión de vapor y la trayectoria que sigue el refrigerante a través del sistema.

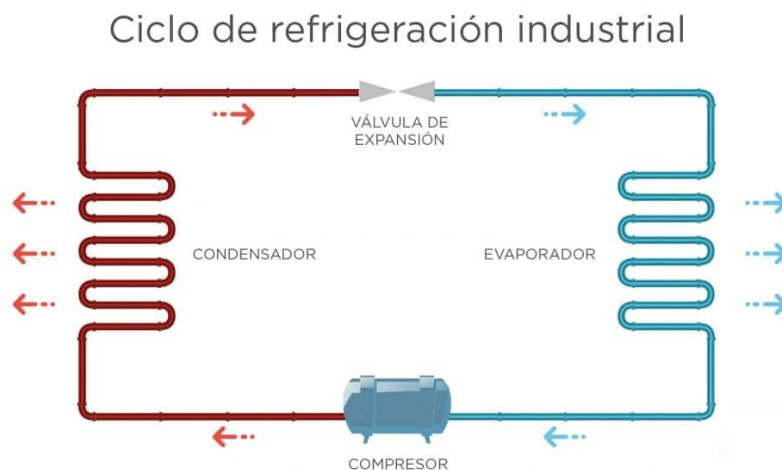


Figura 3.3.1: Esquema básico del ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizado para la extracción de calor en sistemas termostáticos.

En temperaturas bajas, uno de los retos más importantes es la condensación de humedad en las partes frías del sistema y las pérdidas térmicas que se producen a partir del ambiente. La humedad ambiental tiende a condensarse y luego congelarse cuando la temperatura en la superficie baja por debajo del punto de rocío del aire, creando capas de hielo que pueden comprometer la estabilidad térmica y hacer que el compresor trabaje más. Por esta razón, el aislamiento térmico se vuelve fundamental en el diseño. Utilizar materiales con escasa conductividad térmica posibilita una disminución importante en el flujo de calor desde el medio ambiente hacia el volumen frío, lo cual reduce la utilización de energía y mejora la estabilidad térmica del sistema a lo largo de la operación continua (Aranda & Merlone, 2023).

3.4. Control térmico (ON/OFF con histéresis)

El sistema que se encarga de regular la transferencia de energía dentro del baño termostático para conservar una temperatura cercana a la fijada como consigna se conoce como control térmico. La temperatura del fluido no reacciona de inmediato a la activación o desactivación de los actuadores debido a la inercia térmica que se encuentra en los sistemas de calefacción y refrigeración. Por eso es importante aplicar tácticas de control que sean capaces de sostener la estabilidad sin producir conmutaciones excesivas. La razón por la que se utiliza un sistema de control ON/OFF con histéresis en este proyecto es debido a su fiabilidad y facilidad para implementarlo en aplicaciones térmicas de rango moderado.

3.4.1. Dinámica del Control de Dos Posiciones

El control ON/OFF, también conocido como control de dos posiciones, es una estrategia en la que el actuador tiene solo dos estados posibles: encendido o apagado. En virtud de este principio, el sistema enciende el dispositivo de calefacción o refrigeración si la temperatura se aparta del valor establecido y lo apaga cuando vuelve a acercarse a ese mismo valor. No obstante, tras la desactivación del actuador, la temperatura sigue cambiando debido a la inercia del sistema y a la capacidad térmica del fluido, lo que genera una oscilación natural alrededor del punto de operación (Ogata, 2010). Factores como la velocidad de circulación interna, el volumen del fluido, la potencia térmica instalada y las pérdidas hacia el medio ambiente determinan el comportamiento de estas oscilaciones.

3.4.2. Mecanismo de Histéresis (Brecha Diferencial)

Se establece una banda diferencial llamada histéresis para prevenir el fenómeno denominado chattering, que se caracteriza por las conmutaciones repetidas y veloces del actuador alrededor del punto de consigna. Este mecanismo fija dos límites operativos: uno inferior (T_L) y otro superior (T_H). El sistema enciende el actuador cuando la temperatura excede uno de estos límites y lo apaga solo cuando llega al límite contrario. De esta manera, se evita la activación innecesaria y se disminuye el deterioro mecánico y eléctrico de compresores, relés y elementos calefactores (Ogata, 2010). El ancho de la banda de histéresis puede determinarse mediante la diferencia entre los límites superior e inferior de operación, como se observa en la ecuación (3.4.1).

$$H = T_H - T_L \quad (3.4.1)$$

Donde:

H corresponde a la banda de histéresis [$^{\circ}\text{C}$].

T_H representa el límite superior de activación [$^{\circ}\text{C}$].

T_L representa el límite inferior de activación [$^{\circ}\text{C}$].

La conducta térmica del sistema está directamente afectada por el ancho de esta banda. Si se usa una banda angosta, la temperatura se mantiene más cerca del valor de consigna y mejora la estabilidad térmica; sin embargo, aumenta la frecuencia con que los actuadores hacen conmutación. Sin embargo, una banda ancha disminuye la cantidad de activaciones, aunque genera oscilaciones más amplias en la temperatura. Por esta razón,

la elección apropiada de la histéresis es un acuerdo entre el comportamiento dinámico del sistema, la estabilidad térmica y la protección de los componentes (Ding et al., 2021).

A continuación se muestra el comportamiento de la temperatura en un sistema con histéresis, vease la banda muerta conformada por la histéresis superior e inferior (línea punteada) alrededor del punto de consigna:

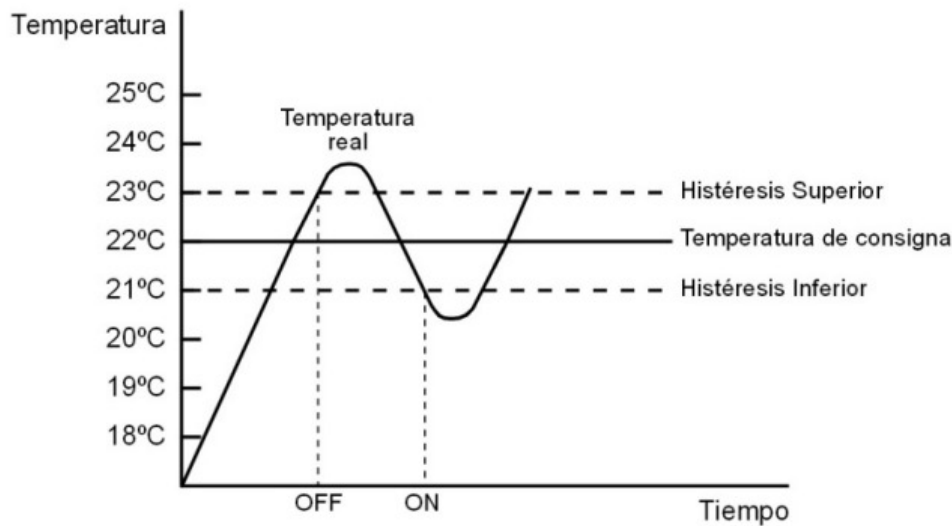


Figura 3.4.1: Gráfico que muestra el comportamiento de un termostato con histéresis

3.5. Tipos de sensores de temperatura

Uno de los componentes más importantes para un sistema termostático que se utiliza en aplicaciones metrológicas es la medición de la temperatura, pues la confiabilidad del proceso de calibración depende directamente de lo precisas y estables que sean las lecturas. La elección del sensor se basa en elementos como la linealidad, la estabilidad a largo plazo, el rango de operación, la sensibilidad y la incertidumbre relacionada con la medición. Los termistores, las resistencias térmicas RTD y los termopares son algunos de los sensores más empleados en sistemas térmicos. Cada uno tiene propiedades específicas que determinan su comportamiento y uso dentro del sistema.

3.5.1. RTD (Pt100)

Los sensores RTD (Resistance Temperature Detector) operan basándose en la variación de la resistencia eléctrica de un material conductor según la temperatura. El sensor Pt100, por su alta estabilidad, repetibilidad y comportamiento casi lineal en un amplio rango de temperaturas, es uno de los más empleados en aplicaciones metrológicas. Su nombre deriva de que tiene una resistencia nominal de $100\ \Omega$ a 0°C , la cual varía predeciblemente con la temperatura ambiental (Nordtest, 1994). El comportamiento eléctrico del sensor Pt100 puede aproximarse mediante una relación lineal entre la resistencia y la temperatura, descrita en la ecuación (3.5.1).

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (3.5.1)$$

Donde:

R_T corresponde a la resistencia del sensor a una temperatura T [Ω].

R_0 representa la resistencia nominal del sensor a 0 °C [Ω].

α es el coeficiente de temperatura del platino [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

T corresponde a la temperatura medida [$^{\circ}\text{C}$].

Los sensores Pt100 son vistos como un estándar en los sistemas de calibración y control térmico, debido a su elevada precisión y baja deriva. Para corregir el impacto de la resistencia de los conductores de conexión y disminuir los errores sistemáticos relacionadas con el cableado, se utilizan configuraciones de 3 o 4 hilos en aplicaciones más precisas (European Accreditation, 2022).

3.5.2. Termistores (NTC)

Los termistores NTC (Negative Temperature Coefficient) son dispositivos semiconductores cuya resistencia eléctrica disminuye cuando la temperatura se eleva. Estos sensores son muy sensibles a pequeñas variaciones térmicas, lo que posibilita la detección de cambios veloces de temperatura e impulsa la aplicación de sistemas de protección y supervisión térmica en el interior del sistema. (Ding et al., 2021).

A diferencia de los sensores RTD, la conexión entre la temperatura y la resistencia en los termistores resulta altamente no lineal, lo cual provoca que por lo general se necesiten tablas de calibración o ecuaciones de compensación para una interpretación adecuada de las mediciones. Pese a que tienen más deriva a largo plazo y menos estabilidad metrológica que un Pt100, su sensibilidad elevada, respuesta rápida y coste bajo hacen de ellos una opción apropiada para las funciones auxiliares de protección térmica y monitoreo. (Wang & Wu, 2020).

3.5.3. Termopares

Los termopares son sensores de temperatura ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su capacidad para operar en rangos de temperatura muy amplios y en condiciones exigentes. Su funcionamiento se basa en la generación de una diferencia de potencial eléctrico producida por la unión de dos metales distintos sometidos a diferentes temperaturas.

Aunque presentan buena robustez y rápida respuesta térmica, los termopares poseen mayores incertidumbres de medición en comparación con sensores RTD, principalmente debido a la necesidad de compensar la temperatura de referencia y a su menor estabilidad metrológica. Por esta razón, su utilización en sistemas de calibración de alta exactitud suele ser más limitada (European Accreditation, 2022; Nordtest, 1994).

3.6. Sistema de circulación del fluido

La circulación del líquido es la responsable de una distribución uniforme de la temperatura en el volumen de trabajo. A pesar de que el sistema de calefacción y refrigeración proporciona o retira energía térmica, la motobomba es la responsable de mover esa energía por medio del líquido y disminuir la creación de gradientes térmicos internos. Debido a esto, la elección del sistema de bombeo no solamente tiene un impacto en la velocidad de estabilización, sino también en parámetros metrológicos esenciales como la homogeneidad y la estabilidad térmica del baño. Además, el flujo

generado debe ser suficiente para sostener un régimen de circulación constante sin provocar vibraciones excesivas o alteraciones que interfieran con las mediciones (Cengel, 2002). En la siguiente imagen se muestra un sistema de circulación de fluido, el cual tiene la capacidad de enfriar y calentar el líquido durante su recorrido:

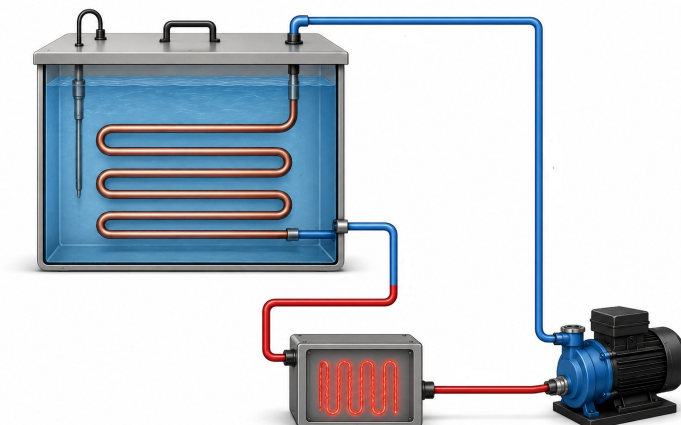


Figura 3.6.1: Ejemplo de sistema de circulación de fluido

3.6.1. Circulación y Homogeneidad

La motobomba debe garantizar una circulación forzada capaz de promover el mezclado constante del fluido y evitar zonas de estratificación térmica dentro del baño. Cuando el líquido permanece con baja circulación, se generan capas límite donde la transferencia de calor ocurre lentamente, produciendo diferencias de temperatura entre distintas regiones del volumen útil. La agitación mecánica permite romper estas capas y aumentar el intercambio térmico entre el fluido y los sensores, favoreciendo una distribución más uniforme de la temperatura. En este contexto, un flujo turbulento moderado resulta deseable, ya que incrementa la transferencia de calor por convección y reduce el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio térmico del sistema (Cengel, 2002).

Desde el punto de vista metrológico, una circulación adecuada mejora la repetibilidad de las mediciones y disminuye la incertidumbre asociada a gradientes espaciales de temperatura. Por ello, la capacidad de bombeo debe seleccionarse considerando variables como el volumen del baño, la viscosidad del fluido de trabajo y las pérdidas de carga generadas por tuberías, serpentines y accesorios internos. Una motobomba sobredimensionada puede inducir vibraciones y perturbaciones térmicas innecesarias, mientras que una capacidad insuficiente limita la homogeneidad del sistema y aumenta los tiempos de estabilización.

3.6.2. Calor de Fricción

El funcionamiento de la motobomba introduce además una carga térmica adicional sobre el sistema, debido a que parte de la energía mecánica suministrada al fluido termina disipándose en forma de calor por fricción viscosa. Este fenómeno adquiere especial importancia durante la operación a bajas temperaturas, donde la viscosidad del líquido aumenta y el sistema de refrigeración debe compensar continuamente dicho

aporte energético para mantener la temperatura de consigna. Como consecuencia, la potencia de la bomba influye directamente en la capacidad frigorífica requerida y en el consumo energético global del equipo (Cengel, 2002).

Además, si el sistema funciona cerca del equilibrio, la estabilidad térmica puede cambiar ligeramente a causa del calentamiento producido por la circulación, sobre todo cuando se trata de volúmenes pequeños o de fluidos con escasa capacidad calorífica. En consecuencia, el diseño del sistema de circulación debe buscar un equilibrio entre la carga térmica añadida y la homogeneidad térmica, asegurando que el fluido se mueva adecuadamente sin generar aumentos notables de temperatura que puedan impactar negativamente en el rendimiento metrológico del baño termostático.

3.7. Control y comunicación con microcontrolador e interfaz gráfica de usuario (GUI)

El sistema digital permite supervisar el comportamiento térmico del baño y visualizar en tiempo real las variables asociadas a su funcionamiento. Mediante el uso de un microcontrolador y una interfaz gráfica, es posible monitorear parámetros operativos relevantes, registrar información del proceso y facilitar la interacción del usuario con el sistema, contribuyendo a un manejo más práctico y confiable del equipo.

3.7.1. Sistemas Digitales y Compensación

Los microcontroladores (MCU) permiten adquirir y procesar las señales provenientes de los sensores de temperatura, ejecutando internamente las acciones necesarias para mantener el funcionamiento térmico del sistema. Además, estos dispositivos pueden implementar rutinas de filtrado y compensación para reducir perturbaciones eléctricas o variaciones asociadas a los componentes electrónicos, mejorando la estabilidad de la medición (Wang & Wu, 2020).

Asimismo, los MCU posibilitan el monitoreo continuo de variables operativas y el almacenamiento de datos en tiempo real, facilitando la supervisión del comportamiento térmico del baño y el análisis de parámetros como estabilidad y respuesta temporal (Ding et al., 2021).

3.7.2. Interfaz de Usuario (GUI) y Conectividad Inalámbrica

La interfaz gráfica de usuario permite visualizar parámetros de operación del baño termostático, como la temperatura medida, el modo de funcionamiento y el comportamiento térmico del sistema mediante gráficas en tiempo real. A través de esta interfaz, el usuario puede definir condiciones generales de operación, como seleccionar el modo de calentamiento o enfriamiento y establecer la temperatura de consigna, mientras que las acciones de control y conmutación son ejecutadas automáticamente por el sistema interno.

De igual manera, la integración de comunicación inalámbrica mediante tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth facilita la supervisión remota y el registro automático de datos, reduciendo errores asociados al registro manual y favoreciendo la trazabilidad de la información en aplicaciones de laboratorio (Manikandan et al., 2024; Panagiotidou, 2025).

3.8. ISO/IEC 17025 y diseño de equipos para calibración

En aplicaciones metrológicas, la elaboración y el uso de instrumentos para calibración deben seguir las pautas establecidas por la norma ISO/IEC 17025, que especifica los requisitos generales para asegurar la competencia técnica de los laboratorios y la fiabilidad de los resultados de medición. No solo es relevante en este contexto conseguir ciertas condiciones térmicas, sino también evidenciar de forma documentada que el sistema funciona de manera trazable, estable y controlada, garantizando la integridad de las mediciones y de los datos producidos durante el proceso de calibración.

3.8.1. Requisitos de Recursos

La cláusula 6.4 de la norma ISO/IEC 17025 establece que los laboratorios deben identificar, controlar y gestionar el equipamiento que pueda influir en los resultados de medición (ISO17025, 2017). En el caso de un equipo de fabricación propia, esto implica demostrar que el baño termostático cumple con las características de desempeño requeridas para aplicaciones de calibración.

Entre los aspectos más importantes se encuentra la verificación del desempeño térmico, la cual debe proporcionar evidencia documentada de que el sistema alcanza los niveles de estabilidad y uniformidad declarados. Este proceso debe realizarse mediante procedimientos de caracterización y calibración ejecutados por laboratorios externos competentes (ISO17025, 2017). Asimismo, la norma requiere establecer programas de mantenimiento que permitan conservar la integridad funcional de componentes críticos como la motobomba y el compresor, garantizando la continuidad del desempeño del sistema a lo largo del tiempo (Manikandan et al., 2024).

3.8.2. Control de Datos

La cláusula 7.11 de la ISO/IEC 17025 establece requisitos relacionados con el control y la integridad de los datos generados durante las actividades de laboratorio. En este sentido, la implementación de sistemas digitales y registro automático de temperatura contribuye a disminuir errores asociados a la intervención humana y mejora la confiabilidad de la información almacenada.

La automatización del registro permite además conservar históricos de operación, facilitar la trazabilidad de las mediciones y asegurar la inmutabilidad de los registros técnicos exigidos por el sistema de gestión de calidad, especialmente cuando se integran interfaces modernas de supervisión y almacenamiento de datos (ISO17025, 2017; Panagiotidou, 2025)..

Capítulo 4

Metodología

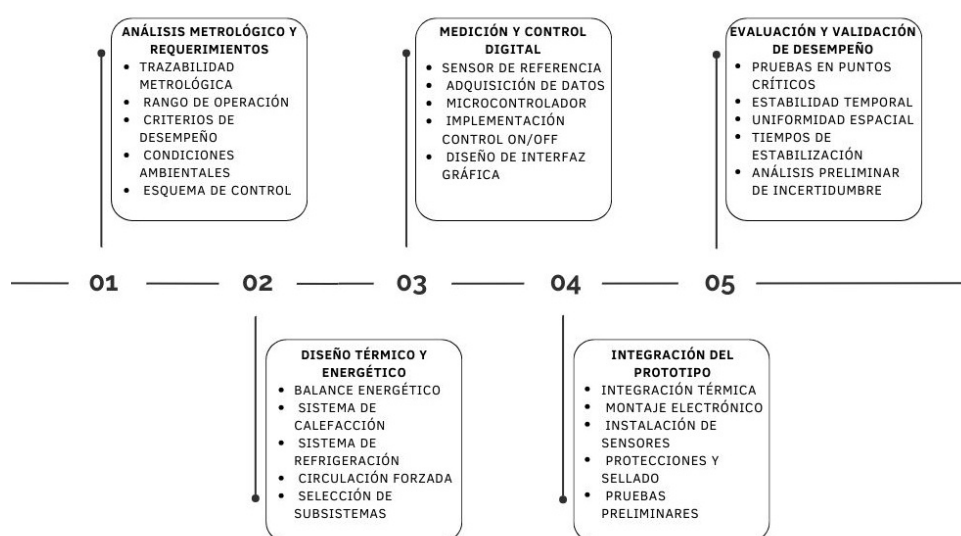


Figura 4.0.1: Esquema de las 5 de fases de la metodología

El presente proyecto tiene como propósito el diseño y fabricación de un baño termostático de líquido para la calibración de termómetros en rangos de baja ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) y alta temperatura ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$), fundamentado en principios de metrología de temperatura, transferencia de calor y control térmico digital.

La metodología adoptada es de carácter experimental-aplicado y se orienta a establecer, desde el punto de vista metódico, estructural y normativo, los criterios necesarios para diseñar, construir y evaluar un sistema térmico apto para procesos de calibración por comparación.

El desarrollo se organizó en cinco fases:

- **Fase 1:** Análisis metrológico y especificación de requerimientos.
- **Fase 2:** Diseño térmico y selección de subsistemas energéticos.
- **Fase 3:** Diseño del sistema de medición y control digital.

- **Fase 4:** Integración del prototipo.
- **Fase 5:** Evaluación experimental y validación del desempeño.

El proyecto se fundamenta en los principios de trazabilidad metrológica, estabilidad y uniformidad térmica, control ON/OFF con histéresis y los requisitos aplicables a equipos utilizados en laboratorios conforme a la norma ISO/IEC 17025 y la Escala Internacional de Temperatura ITS-90.

4.1. Fase 1: Análisis metrológico y especificación de requerimientos

Esta fase tuvo como objetivo definir los criterios técnicos, funcionales y normativos que debía cumplir el baño termostático para ser considerado apto en procesos de calibración de temperatura por comparación.

Las actividades principales de esta fase son:

1. Estudio de trazabilidad metrológica

Se analizaron los principios de calibración por comparación, asegurando que el baño permita transferir trazabilidad a partir de un termómetro patrón calibrado.

Se estableció que el sistema debe permitir:

- Inmersión adecuada de sensores patrón y bajo prueba.
- Estabilidad térmica suficiente durante el tiempo de medición.
- Registro documentado de las condiciones de ensayo.

2. Definición del rango operativo

- **Rango operativo general** Se estableció como requisito que el sistema opere de forma controlada entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, cubriendo aplicaciones de baja y alta temperatura en laboratorio.
- **Rango operativo específico** Se establecen las necesidades operativas identificadas en la empresa Clinical Solutions S.A.S., relacionadas con la calibración de instrumentos de medición de temperatura en rangos específicos utilizados en el sector clínico y biomédico.
 - **Temperaturas de congelación:** Rangos comúnmente utilizados en congeladores para el almacenamiento de muestras, geles refrigerantes y ciertos tipos de medicamentos. ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - **Temperaturas de refrigeración:** Rangos comúnmente utilizados en refrigeradores para el almacenamiento y conservación de muestras, reactivos, vacunas y productos farmacéuticos. ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $8\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - **Temperatura corporal humana:** Valor promedio de la temperatura interna del cuerpo humano en condiciones normales y anormales. ($34\text{ }^{\circ}\text{C}$, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3. Determinación de criterios de desempeño térmico

Se definieron parámetros mínimos asociados a:

- Estabilidad temporal
- Uniformidad espacial dentro del volumen útil.
- Tiempo de estabilización tras cambios de consigna.

4. Análisis de condiciones ambientales

Se consideró la influencia de la temperatura ambiente, corrientes de aire y pérdidas térmicas externas sobre el desempeño del sistema.

5. Definición del esquema de control

Se determinó la implementación de un control de dos posiciones (ON/OFF) con banda de histéresis ajustable, priorizando:

- Robustez operativa.
- Facilidad de implementación.
- Estabilidad suficiente para aplicaciones metrológicas.

Como resultado se obtuvieron las especificaciones técnicas y metrológicas que orientaron el diseño posterior.

4.2. Fase 2: Diseño térmico y selección de subsistemas energéticos

En esta fase se establecieron los criterios estructurales y energéticos necesarios para alcanzar los extremos térmicos definidos, garantizando estabilidad y uniformidad.

Las actividades principales de esta fase son:

1. Análisis de balance energético

Se evaluaron las cargas térmicas del sistema considerando:

- Pérdidas por conducción a través de paredes.
- Convección con el ambiente.
- Radiación térmica.
- Apertura del sistema durante inserción de termómetros.

2. Diseño del subsistema de calefacción

Se optó por una solución de calentamiento por recirculación mediante un intercambiador térmico externo, evitando la inmersión directa de resistencias en el recipiente que contiene el fluido y las sondas de los termómetros.

Esta decisión se fundamentó en:

- Seguridad eléctrica.

- Protección del fluido térmico.
- Mantenimiento simplificado.
- Mejor distribución térmica al combinarse con circulación forzada.

3. Diseño del subsistema de refrigeración

Se integró un sistema de refrigeración por compresión capaz de extraer calor hasta alcanzar $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se analizaron:

- Capacidad frigorífica requerida.
- Aislamiento térmico del volumen útil.
- Minimización de ciclos excesivos del compresor.

4. Diseño del sistema de circulación forzada

Se incorporó una motobomba para garantizar convección forzada del líquido, reduciendo gradientes térmicos y mejorando la uniformidad espacial.

5. Diseño del subsistema de refrigeración

Se consideraron:

- Punto de congelación adecuado para $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Estabilidad térmica hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Compatibilidad química con materiales del sistema.
- Viscosidad para favorecer circulación.

Como producto de esta fase se definió la arquitectura térmica general del baño termostático.

4.3. Fase 3: Diseño del sistema de medición y control digital

Esta fase se centró en la adquisición precisa de temperatura y en la implementación del control térmico digital.

Las actividades principales de esta fase son:

1. Selección del sensor de referencia interno

Se utilizó un RTD tipo Pt100 en configuración de 3 hilos, seleccionado por su estabilidad, repetibilidad y comportamiento prácticamente lineal dentro del rango de operación del sistema. La configuración de tres conductores permite compensar el efecto de la resistencia de los cables de conexión, reduciendo errores sistemáticos asociados a la longitud del cableado y mejorando la exactitud de la medición.

Esta elección responde a criterios metrológicos, ya que los sensores Pt100 son ampliamente utilizados en aplicaciones de calibración debido a su buena estabilidad a largo plazo y a su adecuada respuesta térmica en rangos de baja y media temperatura.

2. Implementación del sistema de adquisición

Para la adquisición de la señal proveniente del RTD se integró un módulo especializado y diseñado específicamente para la lectura de sensores Pt100. Este módulo realiza la conversión analógico-digital de la señal.

Su utilización permitió minimizar errores por cableado, mejorar la resolución efectiva de la medición y garantizar coherencia entre la temperatura física del fluido y el valor digital procesado por el sistema de control.

3. Selección del microcontrolador

Se empleó una plataforma basada en ESP32 como unidad central de procesamiento del sistema, su uso se fundamenta en su capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar el algoritmo de control en tiempo real, gestionar la adquisición de datos y coordinar la comunicación con la interfaz gráfica de usuario.

Entre las funciones principales incluye:

- Lectura de sensores.
- Comunicación inalámbrica.
- Aplicación de algoritmos para el control de la temperatura.
- Activación de actuadores.

4. Implementación del control ON/OFF con histéresis

El sistema de control se implementó bajo una estrategia de dos posiciones (ON/OFF) con banda de histéresis ajustable, estableciendo un umbral de actuación: activación al superar el límite superior y desactivación al descender por debajo del límite inferior.

Esta estrategia permite evitar conmutaciones rápidas alrededor del punto de consigna, reduciendo oscilaciones excesivas y mejorando la estabilidad en régimen estacionario, además de mecanismos de seguridad para prolongar la vida útil de los componentes.

5. Desarrollo de la interfaz gráfica (GUI)

La interfaz gráfica fue desarrollada en Python, permitiendo la interacción directa entre el usuario y el sistema de control, esto ya que la aplicación facilita la visualización en tiempo real de la temperatura, la configuración del punto de consigna y la graficación automática de los datos adquiridos.

Asimismo, posibilita la supervisión remota mediante comunicación inalámbrica, fortaleciendo el carácter documental mostrando la información generada durante las pruebas.

El resultado fue un sistema digital capaz de interactuar con el subsistema térmico y garantizar monitoreo continuo y registro estructurado de datos.

4.4. Fase 4: Integración del prototipo

En esta etapa se realizó el ensamblaje e integración de los subsistemas térmicos, hidráulicos y electrónicos en una estructura física operativa.

Las actividades principales de esta fase son:

1. Integración del sistema de circulación con el sistema de calefacción por recirculación.
2. Integración del evaporador del sistema de refrigeración con el volumen de trabajo.
3. Instalación del sensor RTD en posición representativa del volumen útil.
4. Ensamblaje del sistema electrónico y conexiones de potencia.
5. Integración del microcontrolador con el sistema de adquisición y los actuadores.
6. Implementación de protecciones eléctricas y verificación de aislamiento.
7. Verificación de estanqueidad hidráulica.
8. Pruebas preliminares de funcionamiento con fluido.

El resultado fue el prototipo funcional del baño termostático listo para evaluación experimental.

4.5. Fase 5: Evaluación experimental y validación del desempeño

La fase final consistió en evaluar el comportamiento térmico del sistema bajo criterios metrológicos y verificar su aptitud para procesos de calibración. Las pruebas experimentales se estructuraron con base en la estabilización del baño termostático en los puntos de temperatura definidos como críticos para la operación de Clinical Solutions S.A.S., correspondientes a temperaturas de congelación, refrigeración y corporal humana.

Estos valores representan condiciones reales de calibración asociadas a aplicaciones en conservación, almacenamiento controlado y verificación de equipos biomédicos, constituyendo los puntos de referencia para el análisis de desempeño.

4.5.1. Parámetros metrológicos evaluados

Para evaluar el desempeño de un baño termostático, es necesario examinar diversos parámetros térmicos que posibilitan establecer su idoneidad para procesos de calibración. Estas propiedades tienen un impacto directo en la confiabilidad de los resultados que se consiguen al comparar instrumentos de temperatura y en la incertidumbre de medición. La estabilidad térmica, la uniformidad espacial, el tiempo de estabilización y la repetibilidad del sistema son algunos de los parámetros más relevantes. Se emplean frecuentemente para verificar los baños termostáticos y para procesos de verificación metrológica (European Accreditation, 2022; ISO17025, 2017; Nordtest, 1994).

La estabilidad térmica se refiere a la capacidad del sistema de mantener una temperatura constante a lo largo del tiempo, después de haber logrado el equilibrio térmico. Por otro lado, la uniformidad térmica se refiere a cómo se distribuye la temperatura en el volumen útil del baño. Este parámetro analiza si hay gradientes térmicos internos que puedan alterar la comparación entre el patrón de referencia y el dispositivo que está siendo calibrado. El tiempo de estabilización, además, es el intervalo que necesita el sistema para llegar otra vez a condiciones estacionarias tras una variación de consigna, y la repetibilidad permite examinar cuán capaz es el sistema de replicar situaciones semejantes de operación en ciclos continuos bajo las mismas condiciones operativas.

En esta fase se contemplaron dos niveles de evaluación diferenciados por su enfoque:

1. Evaluación interna

Corresponde a las pruebas realizadas por el desarrollador con el propósito de verificar que el sistema cumple con los requerimientos técnicos y metrológicos definidos en la Fase 1, así como de ajustar los parámetros del algoritmo de control para optimizar su desempeño. Estas pruebas también permiten identificar posibles fuentes internas de error asociadas al sistema de medición, al control térmico o a las condiciones ambientales, y confirmar que se alcanzan niveles adecuados de estabilidad temporal y uniformidad espacial antes de someter el equipo a una caracterización formal por parte de un organismo externo.

Las actividades a realizar en este aspecto son:

■ Pruebas de estabilidad temporal

Evaluación de la variación de temperatura en régimen estacionario una vez alcanzada y mantenida la estabilización en cada uno de los puntos definidos.

■ Pruebas de uniformidad espacial

Mediciones multiposición dentro del volumen útil tras alcanzar estabilidad térmica, con el fin de identificar gradientes internos.

■ Evaluación de tiempos de estabilización

Medición del tiempo requerido para que el sistema alcance régimen estacionario después de cambios de consigna entre los puntos definidos, tanto en procesos de calentamiento como de enfriamiento.

■ Análisis preliminar de fuentes de incertidumbre

Se consideraron como posibles contribuciones a la incertidumbre del sistema:

- La resolución del sensor de temperatura, que limita el nivel mínimo de variación detectable.
- La histéresis propia del esquema de control ON/OFF, que introduce una banda intencional de oscilación alrededor del punto de consigna.
- Los gradientes térmicos presentes dentro del volumen útil del baño, que pueden generar diferencias espaciales de temperatura.
- La influencia de las condiciones ambientales externas, tales como variaciones de temperatura ambiente o corrientes de aire.
- La repetibilidad observada en los ciclos sucesivos de estabilización, evaluando la consistencia del sistema al alcanzar el mismo punto de consigna en diferentes ocasiones.

2. Evaluación externa

La evaluación externa corresponde a la caracterización realizada por laboratorios de calibración acreditados, los cuales verifican el desempeño metrológico del equipo mediante procedimientos normalizados que permiten determinar su estabilidad y uniformidad térmica, así como evaluar su comportamiento en los puntos de temperatura previamente definidos.

Como resultado de este proceso, se emiten los respectivos certificados o informes técnicos que documentan el desempeño del sistema. En esta etapa, el desarrollador no valida el equipo bajo criterio propio, sino que la conformidad es establecida por un organismo externo competente, garantizando imparcialidad, trazabilidad formal y respaldo metrológico debidamente documentado.

Capítulo 5

Diseño e implementación

5.1. Arquitectura del sistema

5.1.1. Arquitectura general

El baño termostático desarrollado fue concebido como un sistema de control térmico destinado a la calibración de termómetros mediante el método de comparación, permitiendo generar condiciones estables de temperatura en un rango aproximado entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La arquitectura del sistema integra diferentes subsistemas encargados de la generación, transferencia, control y monitoreo de temperatura, los cuales operan de manera coordinada para garantizar estabilidad térmica, uniformidad espacial y repetibilidad durante los procesos de calibración.

El sistema se encuentra conformado por los siguientes subsistemas principales:

- Sistema térmico
- Sistema de recirculación
- Sistema de medición
- Sistema electrónico y de control
- Interfaz de usuario
- Sistema de seguridad

La operación general del sistema inicia cuando el usuario establece una temperatura objetivo mediante la interfaz local o la interfaz gráfica desarrollada para computador. Luego, el sistema mide de forma constante la temperatura del fluido a través de un sensor Pt100 y compara este valor con la referencia que se ha fijado.

Dependiendo de la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura objetivo, el sistema activa automáticamente el mecanismo de calentamiento o refrigeración correspondiente. Durante ambos modos de operación, la bomba peristáltica mantiene la circulación continua del glicol dentro del recipiente, favoreciendo la uniformidad térmica y reduciendo gradientes de temperatura dentro del volumen de trabajo.

El control general del sistema es ejecutado mediante un microcontrolador ESP32, encargado de la adquisición de datos, procesamiento de señales, activación de actuadores, comunicación con la interfaz gráfica y supervisión general de funcionamiento.

5.1.2. Sistema térmico

El sistema térmico fue diseñado para generar y mantener condiciones controladas de temperatura dentro del recipiente principal del baño termostático, para esto, se implementaron mecanismos independientes de calentamiento y refrigeración, permitiendo operar tanto en temperaturas positivas como negativas.

El proceso de refrigeración se realiza mediante un sistema de compresión de vapor conectado a un serpentín de cobre sumergido dentro del fluido térmico, mediante este mecanismo se extrae calor, permitiendo disminuir progresivamente la temperatura del baño hasta alcanzar valores cercanos a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por otra parte, el calentamiento del fluido se realiza mediante una resistencia eléctrica integrada al circuito de recirculación del sistema, permitiendo transferir energía térmica al fluido térmico durante su circulación.

5.1.3. Sistema de recirculación

Con el propósito de mejorar la uniformidad térmica dentro del baño termostático y tener mayor control de la temperatura, se implementó un sistema de recirculación forzada utilizando una bomba peristáltica, este sistema permite extraer el fluido térmico desde la parte inferior del recipiente principal y conducirlo a través del circuito de calentamiento y recirculación antes de retornarlo nuevamente al tanque.

La circulación continua favorece la convección forzada dentro del volumen de trabajo, reduciendo gradientes térmicos y mejorando la distribución espacial de temperatura, además, el uso de una bomba peristáltica permite evitar el contacto directo entre el mecanismo de bombeo y el fluido térmico, reduciendo riesgos de contaminación y facilitando el transporte del fluido incluso en condiciones de alta viscosidad a bajas temperaturas. La velocidad de circulación del fluido afecta la estabilidad y uniformidad térmica del sistema, influyendo en los tiempos de calentamiento, enfriamiento y estabilización.

5.1.4. Sistema de medición

El sensor se encuentra ubicado dentro del volumen de trabajo del baño termostático, permitiendo la adquisición continua de la temperatura del fluido térmico durante el funcionamiento del sistema, la señal de temperatura adquirida es utilizada como variable de realimentación para el sistema de control, permitiendo activar los mecanismos de calentamiento o refrigeración según la temperatura objetivo configurada por el usuario.

Con el propósito de mejorar la exactitud de las mediciones, el sensor del baño termostático se calibra utilizando un termómetro patrón Fluke, realizando el ajuste correspondiente para igualar las lecturas de temperatura entre ambos instrumentos con el fin de mejorar la confiabilidad del sistema durante aplicaciones de calibración.

5.1.5. Sistema electrónico y de control

Este sistema fue implementado utilizando un microcontrolador ESP32, el cual se encarga de la adquisición de señales, procesamiento de información y control general del funcionamiento del baño termostático, el sistema supervisa continuamente la temperatura medida y la compara con el valor de referencia establecido por el usuario,

activando automáticamente el mecanismo de calentamiento o refrigeración correspondiente dependiendo de la condición térmica del sistema.

La estrategia de control implementada corresponde a un control ON/OFF con banda de histéresis, utilizado para mantener la temperatura dentro de un rango estable alrededor del punto de operación seleccionado. Adicionalmente, el sistema electrónico permite controlar la velocidad de circulación de la bomba mediante modulación PWM, así como gestionar la comunicación con la interfaz gráfica de usuario y la visualización local de información. Esto fue diseñado de esta manera para permitir el monitoreo de las variables principales del sistema y la operación autónoma con la mínima interacción por parte del usuario.

5.1.6. Interfaz de usuario

La interacción con el baño termostático se implementó mediante una interfaz local integrada y una interfaz gráfica de usuario para computador. La interfaz local está compuesta por una pantalla LCD de 20x4 y un teclado matricial 4x4, permitiendo la operación autónoma del sistema sin necesidad de conexión externa, a través de esta interfaz el usuario puede visualizar la temperatura actual del sistema, configurar la temperatura objetivo, ver la temperatura real del equipo y seleccionar entre los distintos modos de conexión.

Adicionalmente, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) destinada al monitoreo remoto y supervisión del sistema. La GUI permite visualizar en tiempo real las variables térmicas y operativas del baño termostático, además de representar gráficamente el comportamiento de la temperatura durante el paso del tiempo. La comunicación entre la GUI y el sistema se realiza mediante conectividad Wi-Fi y Bluetooth, mientras que la comunicación serial es utilizada para la configuración inicial de parámetros de red, incluyendo datos de conexión e información de direccionamiento.

5.1.7. Sistema de seguridad

Con el fin de garantizar una operación segura del sistema, se implementaron diferentes mecanismos de protección eléctrica y térmica, entre estas medidas de seguridad incorporadas se encuentran la conexión a tierra, fusibles de protección, monitoreo térmico de la resistencia, protección térmica del sistema de calentamiento y aislamiento eléctrico de los módulos de potencia.

El monitoreo de la temperatura de la resistencia permite prevenir sobrecalentamiento, que puede poner en riesgo la integridad del sistema o generar daños sobre los componentes internos. De la misma forma, el sistema incorpora relés de estado solido para el accionamiento de cargas de potencia, permitiendo mejorar la seguridad eléctrica y reducir el desgaste mecánico asociado a sistemas de conmutación mecánicos.

5.2. Selección de componentes

5.2.1. Unidad de procesamiento y control

■ Microcontrolador ESP32

El sistema se basa en el microcontrolador ESP32, el cual fue seleccionado como unidad central debido a su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica

integrada y disponibilidad de múltiples interfaces de comunicación como SPI, UART e I2C. Este dispositivo permite la adquisición de datos en tiempo real, la ejecución de algoritmos de control térmico y la gestión de los actuadores del sistema. Además, el ESP32 permite la implementación de menús interactivos, almacenamiento de configuraciones y comunicación con redes inalámbricas.

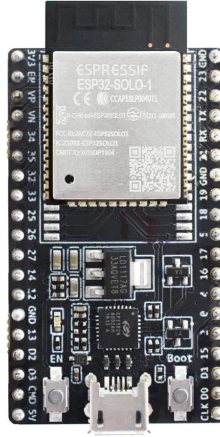


Figura 5.2.1: Microcontrolador ESP32 utilizado en el proyecto
Fuente: (Espressif Systems, n.d.)

5.2.2. Sensores

■ Sensor de temperatura Pt100

Como sensor principal se empleó una resistencia de platino tipo Pt100 de 3 hilos, debido a su alta precisión, estabilidad y repetibilidad, este dispositivo constituye el elemento de referencia para el control de la temperatura del fluido, permitiendo una medición confiable en el rango de operación del sistema. (PT100 ATEX, 2024)

La señal del Pt100 se utiliza directamente en el algoritmo de control, donde se implementa una corrección mediante un offset configurable, lo que permite ajustar el sistema de acuerdo con procedimientos de calibración y compensar errores sistemáticos.

Características técnicas:

- Clase de precisión: grado A
- Tolerancia: ± 0.15 °C a 0 °C y ± 1.05 °C a 450 °C
- Rango de temperatura: -58 a -328.0 °F (-50 °C a 200 °C)
- Resolución: 0.1 °C
- Cable: material PFA

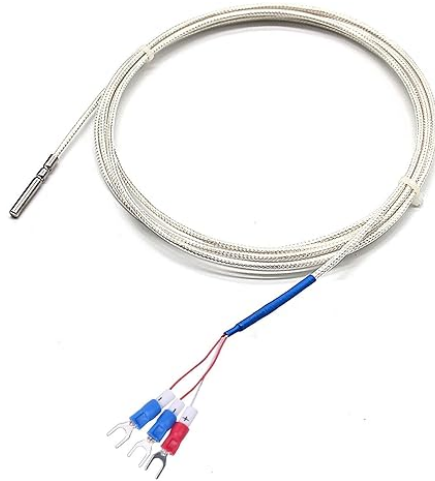


Figura 5.2.2: Pt100 Tipo A de 3 hilos
Fuente: (PT100 ATEX, 2024)

■ Sensor de temperatura NTC 10 k Ω

Se incorporó un termistor NTC 10 k Ω como sensor auxiliar para la medición de la temperatura de la resistencia de calentamiento. Este sensor cumple una función de protección térmica, permitiendo limitar la temperatura máxima del elemento calefactor y evitando condiciones de sobrecalentamiento.

El uso de un sensor secundario mejora la seguridad del sistema y permite implementar mejores estrategias de control térmico.



Figura 5.2.3: Termistor NTC de 10 k Ω
Fuente: (Acortes Software, 2022)

5.2.3. Módulos de comunicación y acondicionamiento

■ Módulo MAX31865

Para la adquisición del sensor Pt100 se utilizó el módulo MAX31865, el cual permite la conversión precisa de la resistencia del sensor en una señal digital. Este dispositivo incorpora compensación de errores, detección de fallas y filtrado, lo que mejora la confiabilidad de la medición. La comunicación con el microcontrolador se realiza mediante el protocolo SPI, permitiendo lecturas estables y de alta resolución, adecuadas para el control térmico del sistema.

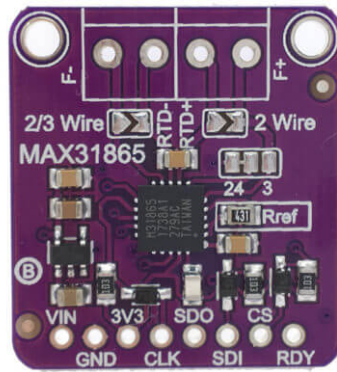


Figura 5.2.4: Módulo MAX31865 utilizado para leer el valor de la Pt100
Fuente: (Electronilab, n.d.)

■ Módulo CP2102

El módulo CP2102 se empleó como interfaz de comunicación serial con el sistema anfitrión. En este proyecto, su función principal no corresponde a la programación del microcontrolador, sino a la transferencia de datos, configuración de redes inalámbricas, registro de variables y diagnóstico del sistema durante la operación, permitiendo el envío de parámetros como direcciones IP y credenciales Wi-Fi, facilitando la integración del sistema con la interfaz gráfica de usuario (GUI).



Figura 5.2.5: Módulo CP2102 para transmisión de datos
Fuente: (JA-Bots, 2024)

■ Interfaz I2C para LCD

Se empleó un adaptador de comunicación I2C para el módulo de visualización, con el objetivo de reducir el número de pines utilizados por el microcontrolador y simplificar el cableado.

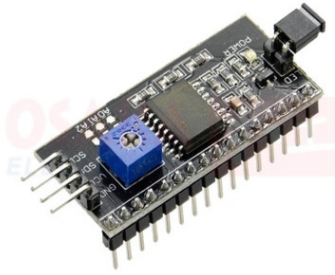


Figura 5.2.6: Módulo I2C para LCD
Fuente: (Osaka Electronics Ltda., 2024)

5.2.4. Módulos de interacción

■ Pantalla LCD 20x4

La interacción con el usuario se realiza mediante una pantalla LCD 20x4, la cual permite visualizar la temperatura actual, la temperatura objetivo, el estado del sistema, el modo de control y los menús de conexión, facilitando el control rápido y fácil acceso al dispositivo.

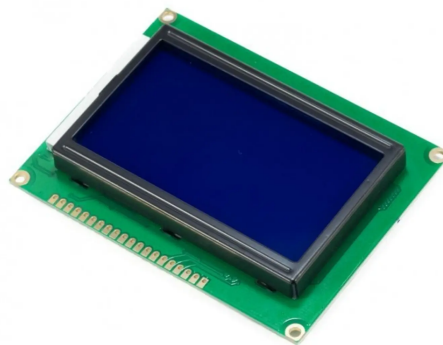


Figura 5.2.7: LCD 20x4 para visualización de menus
Fuente: (Zamux Electrónica, 2024)

■ Teclado matricial

Se incorporó un teclado matricial como medio principal de entrada de datos. Este dispositivo permite la navegación en los menús, la configuración de la temperatura objetivo, la selección de modos de control y la gestión de parámetros de red.

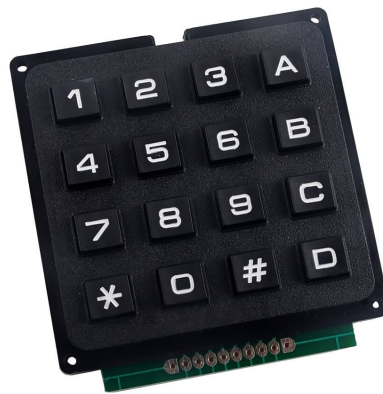


Figura 5.2.8: Teclado matricial 4x4 para la interactuar con el menu
Fuente: (Electronilab, 2026b)

■ Buzzer Activo 5V

El buzzer se empleó exclusivamente como elemento de retroalimentación auditiva durante la interacción del usuario, este produce señales sonoras que confirman la detección de teclas y acciones dentro del sistema, mejorando la experiencia de uso y reduciendo la posibilidad de errores durante la configuración.



Figura 5.2.9: Buzzer activo de 5v
Fuente: (Electronilab, 2026a)

5.2.5. Módulos de alimentación

■ Fuente de voltaje 12 V 10 A

El sistema emplea una fuente de alimentación conmutada de 12 V y 10 A, seleccionada por su capacidad para suministrar energía de forma estable y continua a los actuadores y módulos electrónicos del equipo. Este tipo de fuente proporciona una potencia nominal aproximada de 120 W, lo que permite alimentar simultáneamente la bomba peristáltica, los módulos de control, interfaces de usuario y otros elementos auxiliares, garantizando un margen de seguridad frente a picos de corriente durante el arranque de los dispositivos.



Figura 5.2.10: Fuente conmutada 12V a 10A 120W
Fuente: (Zamux Electrónica, 2026)

■ Módulo MP1584EN

Para la regulación de los niveles de voltaje requeridos por los circuitos electrónicos se empleó el módulo reductor DC-DC basado en el integrado MP1584EN. Este dispositivo permite convertir la tensión de entrada de 12 V hacia valores inferiores ajustables, típicamente en el rango de 0.8 V a 25 V, con una corriente de salida máxima de hasta 3 A y alta eficiencia, superior al 90 % en condiciones nominales.

Su uso se justifica ya que es ideal para alimentar componentes sensibles como el microcontrolador, sensores y módulos de comunicación, ya que proporciona un voltaje estable, bajo nivel de rizado y buena respuesta ante variaciones de carga.

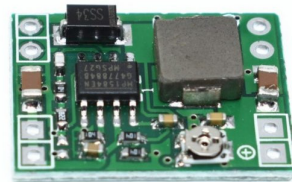


Figura 5.2.11: Módulo reductor de voltaje DC-DC
Fuente: (AV Electronics, 2026)

5.2.6. Líquido refrigerante

Para el proceso de transferencia de calor y estabilización térmica del sistema se seleccionó como fluido de trabajo etilenglicol al 100 % inhibido de la marca FRIOZON, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, sistemas de refrigeración y equipos de control térmico debido a sus propiedades fisicoquímicas, estabilidad térmica y compatibilidad con materiales metálicos y poliméricos. Este fluido presenta una alta capacidad calorífica, adecuada conductividad térmica y un bajo punto de congelación, lo que permite su uso en condiciones de enfriamiento sin riesgo de congelación. (PCC Group, s.f.)

La selección de etilenglicol se fundamentó en los datos proporcionados por la guía técnica para calibración de termómetros Nordest, la cual establece una lista específica de qué líquidos utilizar dependiendo del rango de temperatura. (Nordtest, 1994)



Figura 5.2.12: Líquido refrigerante etilenglicol 100 % inhibido

5.2.7. Actuadores y cargas

■ Relés de estado sólido SSR

Para la conmutación de las cargas de potencia se emplearon relés de estado sólido modelo SSR-25 DA. Estos dispositivos permiten controlar cargas de corriente alterna mediante una señal de entrada en corriente continua, proporcionando aislamiento galvánico entre el circuito de control y la etapa de potencia, lo cual resulta fundamental para proteger la electrónica de control frente a transitorios eléctricos.

Características técnicas:

- Voltaje de control: 3–32 V DC
- Corriente de control: aproximadamente 7–20 mA
- Voltaje de carga: 24–380 V AC
- Corriente nominal de carga: 25 A
- Aislamiento óptico interno



Figura 5.2.13: Relé de estado solido SSR a 25A
Fuente: (Sigma Electrónica, 2026)

■ Compresor

El sistema de enfriamiento se basa en un compresor hermético modelo MK162C-L1C TSE, utilizado comúnmente en sistemas de refrigeración compactos y equipos de

laboratorio. Este componente es el encargado de extraer el calor del fluido mediante un ciclo de compresión de vapor.

Características técnicas:

- Alimentación eléctrica: 115–120 V AC, 60 Hz
- Potencia: 1/5 HP
- Refrigerante compatible: R134a



Figura 5.2.14: Compresor Samsung MK162C L1U

■ Resistencia de calentamiento

Para la generación de calor se empleó una resistencia tubular de acero inoxidable similar a la utilizada en dispensadores comerciales de agua caliente, este tipo de elemento calefactor se caracteriza por su alta durabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad para trabajar en contacto directo con fluidos.

La selección de esta resistencia se fundamenta en su disponibilidad comercial, robustez y eficiencia en la transferencia de calor. Además, su diseño encapsulado en acero inoxidable permite una operación segura en ambientes húmedos y facilita su integración dentro del sistema hidráulico de la bañera termostático.



Figura 5.2.15: Resistencia dispensador de agua caliente

■ Bomba peristáltica

El sistema de circulación del fluido se basa en una bomba peristáltica modelo Kamoer KPHM600-12B3B17. Este tipo de bomba resulta especialmente adecuado para aplicaciones de control térmico debido a que el fluido transportado no entra en contacto directo con los componentes mecánicos internos, lo que reduce la contaminación, el desgaste y la corrosión, además que las bombas peristálticas son adecuadas para la transferencia de líquidos viscosos, característica principal de los líquidos refrigerantes cuando se encuentran a temperaturas bajo cero.

Asimismo, permite un control preciso del caudal mediante modulación por ancho de pulso (PWM), facilitando la implementación de estrategias dinámicas de homogenización térmica, significando que la bomba cumple la función de distribuir uniformemente el calor dentro del fluido, contribuyendo a la reducción de gradientes térmicos y a la mejora de la estabilidad durante los procesos de calibración. (Kamoer Fluid Tech, n.d.)

Características técnicas:

- Alimentación: 12 V DC
- Tipo de motor: Sin escobillas (brushless)
- Caudal nominal: 600 mL/min (20,3 fl oz/min).
- Control de velocidad: ajustable mediante PWM.
- Tubo compatible: BPT con diámetro interno de 0.252 in y diámetro externo de 0.378 in.
- Material del tubo: PharMed BPT, resiste temperaturas de entre -59 °C hasta 300 °C. (Saint-Gobain, n.d.)



Figura 5.2.16: Bomba peristáltica Kamoer KPHM600-12B3B1

5.3. Diseño del sistema electrónico

5.3.1. Diseño del circuito esquemático

El diseño del sistema electrónico se desarrolló con el objetivo de integrar de manera eficiente los módulos de control, adquisición, interacción y accionamiento necesarios para el funcionamiento del baño termostático. La arquitectura electrónica se estructuró alrededor del microcontrolador Espressif Systems ESP32, encargado de actuar como

unidad central de procesamiento, supervisión y coordinación de todas las operaciones del sistema.

La etapa de alimentación se implementó a partir de una fuente principal de 12 VDC conectada a la red eléctrica de 120 VAC. Esta tensión se utiliza directamente para energizar la bomba peristáltica, mientras que los módulos electrónicos de control y adquisición son alimentados mediante un convertidor reductor DC-DC basado en el integrado MP1584EN, responsable de proporcionar una salida regulada de 5 V para garantizar un funcionamiento estable y seguro de los dispositivos electrónicos.

Para la adquisición y monitoreo de temperatura, el sistema incorpora un módulo MAX31865 conectado al ESP32 mediante protocolo de comunicación SPI, permitiendo la lectura digital del sensor Pt100 utilizado como referencia principal de temperatura del baño termostático. De forma complementaria, se integró un sensor NTC destinado al monitoreo térmico de la resistencia calefactora, con el fin de supervisar posibles incrementos excesivos de temperatura y mejorar la seguridad operativa del sistema.

La interacción con el usuario se implementó mediante una pantalla LCD 20x4 con interfaz I2C y un teclado matricial 4x4 conectados directamente al microcontrolador, facilitando la configuración y supervisión local de las variables del sistema. Adicionalmente, se incorporó un buzzer como mecanismo de retroalimentación auditiva durante la navegación por el menú y la ejecución de distintas operaciones, mejorando así la experiencia de uso y la interacción con el equipo.

5.3.2. Etapa de accionamiento y control de cargas

La etapa de accionamiento fue desarrollada con el propósito de controlar las cargas eléctricas asociadas a los sistemas de calentamiento, refrigeración y recirculación del baño termostático. Las cargas de corriente alterna corresponden principalmente al compresor de refrigeración y a la resistencia calefactora, ambos alimentados mediante una línea de 120 VAC.

El accionamiento de estas cargas se implementó mediante relés de estado sólido (SSR) controlados directamente desde las salidas digitales del microcontrolador ESP32. La utilización de SSR permite realizar conmutación electrónica sin partes mecánicas móviles, reduciendo el desgaste eléctrico y mejorando tanto la confiabilidad como la vida útil del sistema de potencia.

Para el sistema de recirculación se incorporó una bomba peristáltica alimentada a 12 VDC, encargada de mantener el flujo continuo del glicol a través del circuito térmico. El control de velocidad de la bomba se realiza mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM), permitiendo ajustar el caudal de circulación de acuerdo con las condiciones de operación del sistema. Sin embargo, debido a que el ESP32 opera con niveles lógicos de 3.3 V y el módulo de control de la bomba requiere señales PWM de 5 V, fue necesaria la implementación de una etapa adaptadora de nivel lógico basada en transistores. Esta interfaz permite adaptar correctamente los niveles de tensión y conservar las características de la señal PWM, garantizando un control estable y confiable de la bomba peristáltica durante la operación del sistema.

5.3.3. Etapa de adquisición de temperatura

La etapa de adquisición de temperatura fue desarrollada para realizar el monitoreo continuo de las variables térmicas del sistema y proporcionar al microcontrolador

ESP32 la información necesaria para ejecutar las acciones de control y protección correspondientes. La medición principal de temperatura se implementó mediante un sensor Pt100 clase A de tres hilos conectado al módulo MAX31865, configuración que permite mejorar la precisión de la medición al compensar parcialmente la resistencia de los conductores y reducir los errores asociados al cableado del sensor.

El módulo MAX31865 se encarga de convertir la variación resistiva del Pt100 en datos digitales que posteriormente son transmitidos al ESP32, permitiendo obtener lecturas estables, precisas y compatibles con el sistema de control implementado. De manera complementaria, se incorporó un sensor NTC de 10 k Ω destinado al monitoreo térmico de la resistencia calefactora.

La información obtenida a partir de ambos sensores es procesada continuamente por el sistema para supervisar las condiciones térmicas del baño termostático, detectar posibles condiciones anómalas de operación y ejecutar las estrategias de control y protección necesarias para garantizar un funcionamiento seguro y estable del equipo.

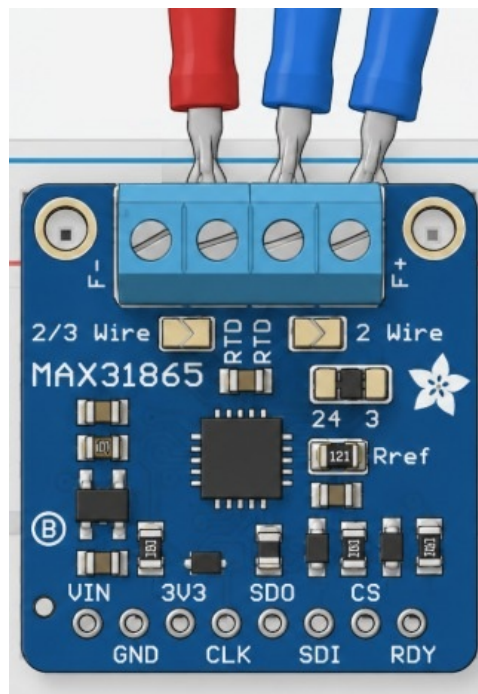


Figura 5.3.1: Esquema de conexión módulo MAX31865 con Pt100

5.3.4. Sistema de protección eléctrica

Con el propósito de garantizar una operación segura y confiable del sistema, se implementaron diferentes mecanismos de protección eléctrica y aislamiento funcional entre las etapas de potencia y control. El sistema incorpora un fusible general ubicado en la entrada principal de alimentación, encargado de proteger el equipo frente a condiciones de sobrecorriente y posibles fallos eléctricos. De igual manera, se implementó conexión a tierra en los principales elementos metálicos del sistema, incluyendo el chasis de aluminio, el compresor y la resistencia calefactora, con el fin de reducir riesgos asociados a fugas de corriente y mejorar la seguridad durante la operación.

La electrónica de control fue diseñada para operar completamente en corriente continua mediante una fuente conmutada de 12 VDC a 10A, permitiendo mantener una

separación funcional respecto a las cargas alimentadas directamente con 120 VAC, este diseño contribuye a disminuir interferencias eléctricas, mejorar la estabilidad del sistema electrónico y reducir riesgos para los módulos de control.

Además de eso, el uso de relés de estado sólido permite mantener aislamiento entre las señales de control provenientes del microcontrolador y las cargas de potencia conectadas a la red eléctrica, proporcionando una conmutación más segura y confiable. Como medida adicional de protección, el sistema monitorea la temperatura de la resistencia calefactora mediante un sensor NTC, evitando posibles condiciones de sobrecalentamiento durante la operación del baño termostático.

5.4. Implementación y prototipado

5.4.1. Implementación en protoboard

La implementación inicial del sistema electrónico se realizó mediante prototipado sobre protoboard, permitiendo desarrollar y verificar progresivamente las conexiones, algoritmos de control y sistemas de comunicación antes de diseñar la PCB.

Las primeras pruebas se realizaron utilizando una plataforma Arduino convencional, enfocándose principalmente en la adquisición de temperatura mediante el módulo MAX31865 y el sensor Pt100. Para configurar el módulo MAX31865 a una Pt100 de 3 hilos, se modificaron las pistas en su estructura de acuerdo con las instrucciones brindadas por el fabricante (Adafruit Industries, 2026). En la siguiente se muestran resaltados los puntos críticos para el funcionamiento del sensor con el módulo:

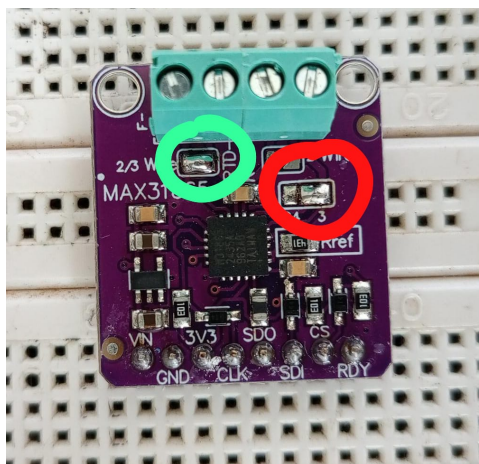


Figura 5.4.1: Módulo MAX3165 adaptado a Pt100 de 3 hilos, los círculos rojo y verde indican las zonas donde se modificó

Con el módulo adaptado, la Pt100 se conecta a las borneras integradas. Para la visualización de los datos inicialmente se realiza la lectura desde el monitor serial de la aplicación de Arduino, y para su lectura externa se emplea una pantalla OLED, donde se prueba el código encargado de medir la temperatura, en este caso la temperatura corporal. En la siguiente imagen se muestra el resultado de la medición de temperatura visualizado en la pantalla OLED:

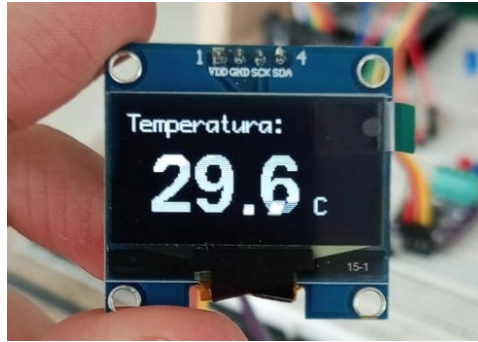


Figura 5.4.2: Valor de temperatura corporal mostrado en pantalla OLED

Debido a su reducido tamaño, se descarta la pantalla OLED y se opta por una pantalla LCD 20x4, la cual se integró en el sistema junto con el teclado matricial para crear la interfaz local del sistema, además, se implementaron los primeros menús de navegación y visualización de las variables principales. El sistema de menús fue desarrollado mediante una máquina de estados, donde cada pantalla y función corresponde a un estado específico del programa y cuyo diseño fue planteado de forma sencilla e intuitiva para facilitar la interacción del usuario con el equipo, utilizando las teclas A, B, C, D, # y * como controles de navegación y selección entre las diferentes opciones. En la siguiente imagen se presenta el diagrama inicial de navegación, el cual muestra la estructura inicial y el flujo de transición entre los diferentes menús del sistema:

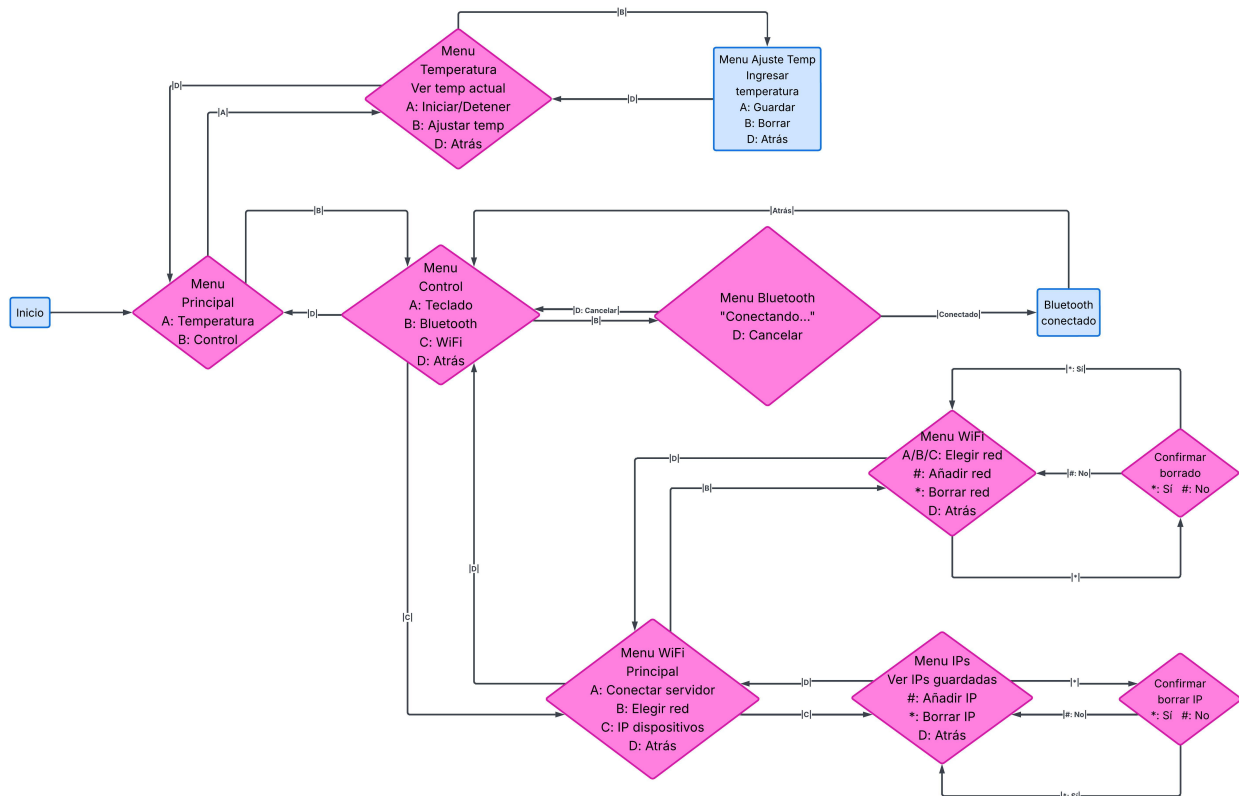


Figura 5.4.3: Diagrama que muestra el flujo general de navegación entre menús.

Para mejorar la experiencia de uso del teclado y hacer más intuitiva la interacción con el sistema, se incorporó un buzzer que proporciona retroalimentación auditiva durante

la navegación por la interfaz local, de esta forma, cada vez que se presiona una tecla el buzzer emite un sonido característico que confirma al usuario la correcta detección de la entrada. Con la estructura básica de la interfaz ya definida, se implementaron las primeras conexiones para el accionamiento de la resistencia calefactora y del compresor mediante relés de estado sólido (SSR). Para verificar su correcta activación y desactivación se aplicó una señal de 3.3 V en los terminales de control (+ y -), después se utilizó un multímetro en modo continuidad conectado a la salida en AC con el fin de comprobar el cierre del circuito al momento de la activación del relé. En la siguiente imagen se muestra la conexión de los SSR.



Figura 5.4.4: Relés de estado solido conectados

Teniendo ya la estructura principal del sistema, el circuito fue adaptado para trabajar con un microcontrolador ESP32, con el objetivo de incorporar capacidades de comunicación inalámbrica mediante Bluetooth y Wi-Fi. Esta elección se debe principalmente a su menor tamaño en comparación con un Arduino UNO, así como a que integra de forma nativa conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que elimina la necesidad de módulos externos y simplifica el diseño del sistema.

En este punto se integra la bomba peristáltica como parte de las pruebas de los actuadores del sistema. Este componente cuenta con un cableado de cinco hilos, cuya función, según el fabricante, se distribuye de la siguiente manera:

- Cable negro: Conectado al polo negativo
- Cable rojo: Conectado al polo positivo
- Cable amarillo: retroalimentación de señal
- Cable verde: Puerto de comunicación
- Cable blanco: Control PWM

Para una prueba inicial, se conectan dos mangueras a la bomba peristáltica: una en la entrada y otra en la salida. La manguera de entrada se introduce en un recipiente con agua, mientras que la manguera de salida retorna al balde, luego la bomba se alimenta

mediante la fuente conmutada de 12 V, conectando el cable negro al terminal negativo y los cables rojo y blanco al positivo, de acuerdo con la configuración indicada por el fabricante para su funcionamiento a máxima velocidad. En la siguiente imagen, se puede ver la bomba peristáltica conectada:



Figura 5.4.5: Bomba peristáltica conectada a mangueras

Para regular la velocidad en que la bomba peristáltica hace fluir el líquido, se debe desconectar el cable blanco de los 12 V directos e ingresar una señal PWM de 5 V, pero debido a que la señal PWM generada por la ESP32 es de 3.3 V, fue necesario desarrollar una etapa de adaptación de nivel lógico, encargada de convertir la señal PWM de 3.3 V a una señal compatible de 5 V.

Debido a que la señal utilizada corresponde a señal PWM, no resultaba adecuado emplear métodos convencionales de adaptación de voltaje, ya que estos pueden alterar la forma de onda, modificar el ciclo útil de la señal o generar inestabilidad en el control de velocidad. Por esta razón, se implementó un convertidor de nivel lógico basado en transistores, permitiendo conservar las características temporales de la señal PWM generada por el microcontrolador durante el proceso de adaptación, en la siguiente imagen se ve la simulación del circuito realizado:

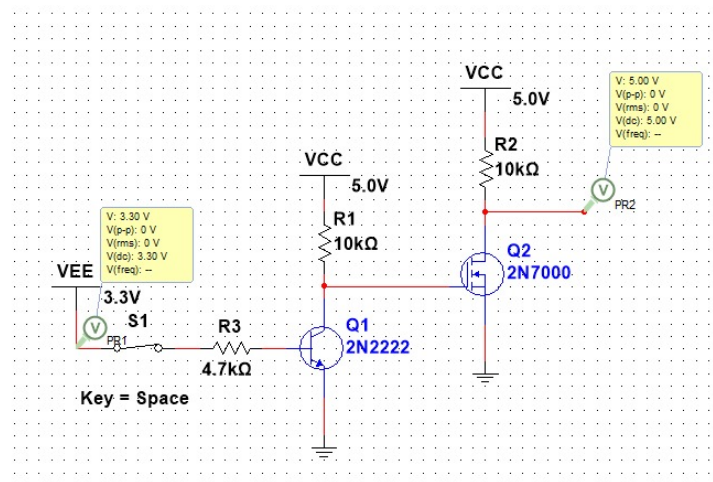


Figura 5.4.6: Simulación del circuito convertidor de nivel lógico en multisim.

Como complemento del sistema y con el fin de mejorar la seguridad, se incorpora un sensor de temperatura tipo NTC de 10 k Ω . La medición se realiza mediante un divisor de tensión, en el cual el microcontrolador lee el voltaje de salida a través de un pin analógico. Adicionalmente, se incluye un trimmer en serie con la resistencia de 10 k Ω , el cual permite realizar un ajuste fino del divisor resistivo, compensando tolerancias de los componentes y mejorando la precisión de las lecturas, evitando así desviaciones en la medición de temperatura. La siguiente imagen muestra el circuito del divisor de tensión con el NTC y trimmer implementado.

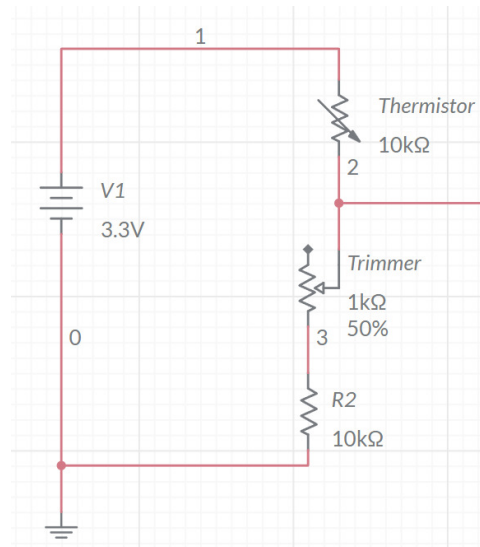


Figura 5.4.7: Circuito divisor de voltaje con NTC realizado en multisim

A partir de este valor, el sistema calcula la resistencia del termistor utilizando la relación del divisor resistivo, obteniendo el valor de la NTC en función del voltaje medido. Debido a que la respuesta del termistor NTC es no lineal respecto a la temperatura, se emplea el modelo Beta para aproximar la conversión entre resistencia y temperatura. Esta relación se expresa mediante la ecuación (5.4.1).

$$T_K = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R_{NTC}}{R_0} \right)} \quad (5.4.1)$$

Donde:

T_K corresponde a la temperatura calculada en Kelvin [K].

T_0 representa la temperatura de referencia del termistor [K].

B es la constante Beta característica del termistor [K].

R_{NTC} corresponde a la resistencia medida del termistor NTC [Ω].

R_0 representa la resistencia nominal del termistor a la temperatura de referencia [Ω].

y finalmente se convierte a grados Celsius restando 273,15. Esta implementación permite obtener una medición más precisa de la temperatura a partir de la variación no lineal del sensor.

El prototipado se realizó utilizando una protoboard de gran formato junto con un shield de expansión para ESP32, permitiendo conectar simultáneamente los diferentes módulos electrónicos del sistema y facilitando el acceso a las líneas de alimentación y pines de conexión. Durante las primeras etapas de prueba, el sistema era alimentado mediante

conexión USB desde el computador, aprovechando las salidas de 5 V proporcionadas por el shield de expansión para alimentar los módulos de baja potencia.

Pero a medida que se integraron mayores cargas, se conectó la fuente conmutada de 12 V a un convertidor DC-DC MP1584EN, con el fin de obtener una alimentación más estable e independiente para el sistema electrónico y los actuadores auxiliares. Esta decisión se tomó debido a que durante las pruebas iniciales se presentaban parpadeos frecuentes en la pantalla LCD y reinicios inesperados del microcontrolador, asociados principalmente a limitaciones de corriente y caídas de tensión durante la operación del sistema. Adicionalmente, se consideró que la futura implementación de comunicación Wi-Fi y Bluetooth incrementaría considerablemente el consumo energético del ESP32, haciendo necesaria una fuente de alimentación con mayor estabilidad y capacidad de suministro de corriente.

5.4.2. Validación de subsistemas

Una vez implementadas las conexiones principales del sistema electrónico, se realizaron pruebas independientes sobre los diferentes subsistemas con el propósito de validar su funcionamiento antes de efectuar la integración completa del baño termostático.

Primeramente, se verificó el funcionamiento del sistema de medición mediante pruebas de adquisición de temperatura utilizando el sensor Pt100 junto con el módulo MAX31865. Para ello, se ubicaron simultáneamente las sondas de un termómetro UNIT UT320D y la Pt100 en el lado frío de una celda Peltier, con el fin de comparar las lecturas. Durante la prueba se evidenció que la señal de la Pt100 presenta ruido, el cual se manifiesta en una tendencia general de disminución progresiva de la temperatura, interrumpida por saltos puntuales de aproximadamente medio grado, en los que la lectura aumenta de forma repentina para posteriormente retomar nuevamente la tendencia de descenso. Este comportamiento se repite de manera periódica, generando variaciones no coherentes con el visto en el equipo patrón. En la siguiente imagen se evidencia la similitud de las mediciones entre el sensor y el equipo patrón:



Figura 5.4.8: A la izquierda el termómetro UT320D, y a la izquierda la LCD mostrando el valor de temperatura

Asimismo, se realizaron pruebas preliminares sobre la interfaz local y los sistemas de comunicación inalámbrica, verificando inicialmente el envío y recepción básica de información entre el ESP32 y Python. Estas primeras pruebas permitieron comprobar el

funcionamiento general de la comunicación antes de implementar protocolos más complejos de intercambio de datos y monitoreo.

En relación con el sistema de refrigeración, el circuito asociado al compresor fue implementado con apoyo técnico especializado debido a los requerimientos eléctricos y mecánicos asociados al manejo de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. El conjunto fue ensamblado dentro de la estructura de un dispensador de agua reutilizado, seleccionado debido a que sus dimensiones, distribución interna y capacidad de alojamiento resultaban adecuadas para integrar los componentes del sistema de refrigeración y recirculación, tal y como se muestra en la imagen:



Figura 5.4.9: Estado inicial del gabinete con el sistema de compresión instalado.

El compresor fue instalado en la parte inferior del gabinete, permitiendo mantener una distribución similar a la utilizada en equipos de refrigeración convencionales y facilitando la organización del condensador, filtro secador, tuberías de cobre y demás elementos asociados al circuito de refrigeración, sumado a esto se implementó un serpentín de cobre ubicado en el interior del recipiente de almacenamiento del líquido de trabajo, permitiendo que el intercambio térmico generado por el sistema de compresión de vapor redujera la temperatura del fluido durante el funcionamiento del compresor.



Figura 5.4.10: Serpentín de cobre alrededor de la pared interna del recipiente, permite contacto directo con el líquido.

Con el fin de verificar el funcionamiento preliminar del sistema de refrigeración, se realizaron pruebas manteniendo el compresor encendido de forma continua hasta alcanzar bajas temperaturas en el agua contenida dentro del depósito. Durante estas pruebas el agua se congeló hasta aproximarse a temperaturas cercanas a los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, permitiendo comprobar la capacidad del sistema para generar enfriamiento antes de implementar las estrategias de control térmico definitivas.



Figura 5.4.11: Termómetro de prueba mostrando temperatura del agua congelada a $-18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Las pruebas iniciales del sistema de calentamiento permitieron verificar el accionamiento correcto de la resistencia calefactora y su capacidad para incrementar la temperatura de manera controlada, adicionalmente se realizó el recubrimiento de la resistencia con espuma elastomérica aluminizada con el objetivo de reducir pérdidas térmicas hacia el entorno, mejorar la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo y minimizar el riesgo de contacto directo con superficies a alta temperatura durante las pruebas preliminares.



Figura 5.4.12: Resistencia instalada previamente debajo del recipiente.

Luego se realizaron pruebas iniciales sobre la bomba peristáltica utilizando agua como fluido de circulación, con el objetivo de evaluar su respuesta ante diferentes valores de PWM y verificar la variación de velocidad del flujo generado. Durante estas pruebas se identificó el rango operativo funcional de la bomba, observándose que valores bajos de PWM producían la detención del motor, mientras que valores superiores permitían un funcionamiento estable y una circulación continua del fluido.

En las pruebas de comunicación Bluetooth, el ESP32 fue configurado como un dispositivo Bluetooth serial mediante la librería `BluetoothSerial`, permitiendo establecer una conexión directa con la interfaz desarrollada en Python. Inicialmente, la transmisión se limitó al envío de caracteres y variables simples, con el objetivo de verificar la estabilidad de la conexión, la correcta recepción de información y la capacidad de visualizar datos provenientes del sistema en la interfaz local LCD.

Por otra parte, las pruebas de comunicación Wi-Fi se realizaron utilizando la librería `Wi-Fi.h`, configurando inicialmente la red y dirección IP directamente dentro del código del ESP32. La comunicación se estableció mediante una conexión TCP/IP básica entre el ESP32 y Python, permitiendo comprobar el envío y recepción de datos sencillos relacionados con el estado del sistema y las variables de temperatura. Estas pruebas iniciales permitieron validar el funcionamiento de la comunicación inalámbrica antes de desarrollar funciones más avanzadas de configuración y almacenamiento de redes.

Durante las pruebas iniciales de comunicación se presentaron inconvenientes relacionados con la interpretación de los datos transmitidos entre el ESP32 y Python, debido a diferencias en la forma en que ambas plataformas empaquetaban y decodificaban la información enviada. Esto ocasionaba que algunos valores recibidos fueran incorrectos o inconsistentes respecto a los datos originalmente transmitidos. Para solucionar este problema, se ajustó la estructura de envío y recepción de datos, definiendo un formato fijo de transmisión y sincronizando la interpretación de variables entre ambos sistemas, permitiendo una comunicación más estable y confiable.

5.4.3. Ensamble preliminar del sistema

Una vez verificado el funcionamiento individual de los diferentes subsistemas, se realizó la integración física preliminar del prototipo con el propósito de ensamblar los principales elementos térmicos, mecánicos y electrónicos dentro de la estructura seleccionada para el baño termostático. Durante esta etapa se efectuó la conexión conjunta entre el sistema de calentamiento, sistema de refrigeración y sistema de recirculación, permitiendo realizar las primeras pruebas básicas de funcionamiento del sistema completo. Como actividad

complementaria, se envuelve el recubrimiento de icopor en el recipiente de líquido con cinta para ductos, esto para asegurar un correcto contacto con las paredes externas del recipiente y asegurar un correcto aislamiento.



Figura 5.4.13: El antes y el después de aplicar recubrimiento en el tanque.

El montaje incluyó la incorporación de la bomba peristáltica, las líneas de circulación del fluido y las conexiones asociadas a la resistencia calefactora, verificando el recorrido del líquido y la compatibilidad entre los diferentes elementos integrados. Para la realización de las conexiones de circulación se tuvo en cuenta la distribución de entradas y salidas presentes en la resistencia calefactora, las cuales se muestran en la siguiente imagen:



Figura 5.4.14: Distribución de entradas, salidas y partes esenciales de la resistencia.

El conducto de entrada de líquido de la resistencia (Water Inlet) ya se encontraba conectado al drenaje principal ubicado en la parte inferior del recipiente de almacenamiento del líquido, permitiendo el ingreso del fluido hacia la resistencia calefactora. Este drenaje puede observarse en la siguiente imagen:



Figura 5.4.15: A la izquierda se ve la manguera que conecta la entrada de líquido de la resistencia con el recipiente, a la derecha se ve el drenaje por el cual el líquido es bombeado.

Con el propósito de generar circulación continua del fluido, la entrada de la bomba peristáltica fue conectada a la salida de líquido caliente de la resistencia (Hot Water Outlet), luego la salida de la bomba fue conectada a un conducto ubicado en la parte superior del recipiente de almacenamiento, permitiendo el retorno del líquido y cerrando el ciclo de circulación del sistema. Las conexiones realizadas pueden observarse en la siguiente imagen:

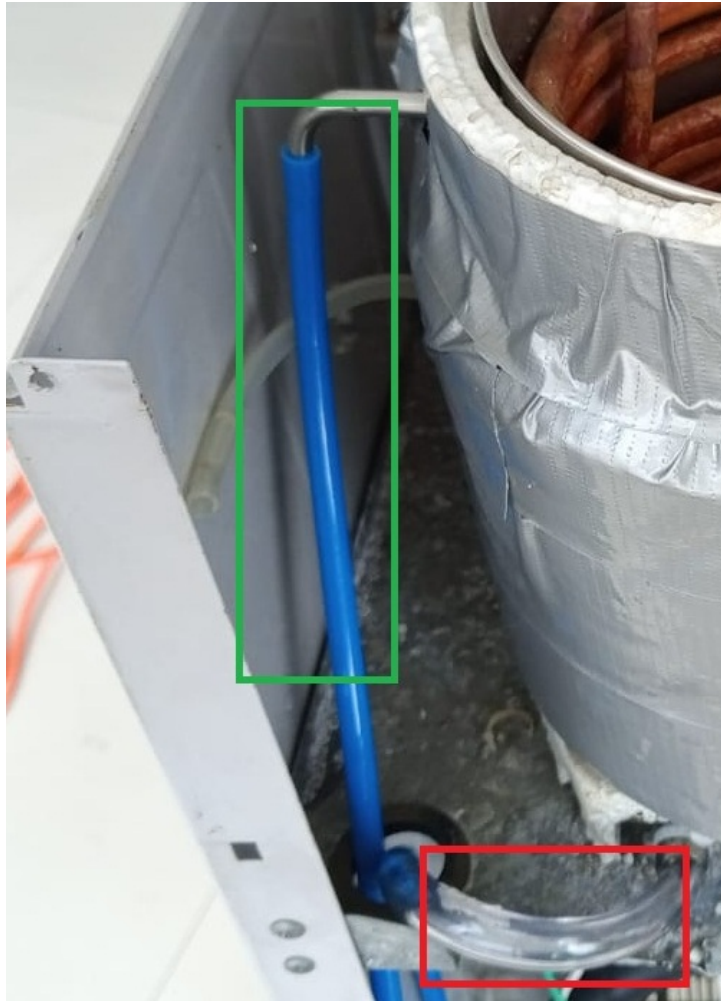


Figura 5.4.16: En color rojo se señala la manguera mediante la cual el líquido sale del recipiente, mientras que en color verde se indica la manguera de retorno del líquido hacia el tanque.

Para la integración entre el sistema electrónico y el sistema térmico, se realizó el corte del conductor de fase correspondiente tanto a la resistencia de calentamiento como al compresor, conectándolos posteriormente a la salida de sus respectivos relés de estado sólido. De esta manera, al activarse cada SSR se cierra el circuito eléctrico, permitiendo la alimentación y funcionamiento del sistema correspondiente.

En el caso de la bomba peristáltica y el sensor de temperatura NTC, estos fueron ubicados en la parte interna de la cabina, mientras que el circuito principal de control se mantuvo de forma externa, debido a esta distribución, se utilizó un cable plano para transportar las señales del sensor NTC y la señal PWM desde el interior de la cabina hasta la protoboard ubicada en el exterior.

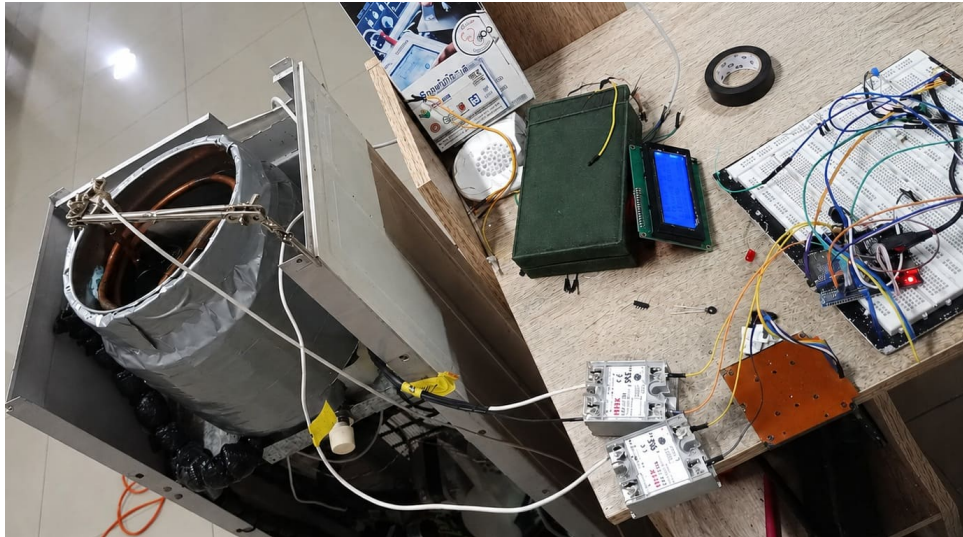


Figura 5.4.17: Sistema completo que integra el circuito electrónico con el sistema térmico.

5.5. Desarrollo del sistema de control

Con la finalidad de automatizar el funcionamiento térmico del baño termostático y conservar la temperatura del fluido en el valor establecido por el usuario, se desarrolló el sistema de control. Esto se logró mediante la coordinación de los sistemas de recirculación, refrigeración y calentamiento. Se implementó la lógica de control en el microcontrolador ESP32, que tiene como responsabilidad realizar las mediciones de temperatura, llevar a cabo los algoritmos de control y activar los diversos actuadores del sistema.

A lo largo de esta fase, se implementaron varias estrategias destinadas a asegurar la estabilidad térmica, el funcionamiento seguro y protección de los componentes de potencia. Para ello, se establecieron algoritmos independientes para la resistencia calefactora, el compresor y la bomba peristáltica, además de una lógica general que tiene como función organizar el funcionamiento en conjunto de todos los subsistemas.

5.5.1. Estrategia de control ON/OFF con histéresis

La estrategia de control implementada se basó en un esquema ON/OFF con histéresis, utilizado para regular tanto el sistema de calentamiento como el sistema de refrigeración. Este método fue seleccionado debido a su simplicidad de implementación, estabilidad operacional y facilidad de adaptación a las condiciones térmicas del sistema desarrollado.

El principio de funcionamiento consiste en establecer márgenes de temperatura alrededor del valor objetivo, permitiendo activar o desactivar los actuadores únicamente cuando la temperatura supera determinados límites previamente definidos. De esta forma, se evita que los dispositivos de potencia presenten conmutaciones rápidas o repetitivas ante pequeñas variaciones térmicas cercanas al punto de operación.

$$T_{\text{ON}} = T_{\text{objetivo}} + 2H$$

$$T_{\text{OFF}} = T_{\text{objetivo}} - 2H$$

Donde H corresponde al valor de histéresis implementado para cada subsistema térmico y T_{objetivo} representa la temperatura configurada por el usuario. En el sistema

desarrollado se utilizaron bandas de histéresis independientes para el control de calentamiento y refrigeración, permitiendo adaptar el comportamiento dinámico de cada actuador según sus características de operación y respuesta térmica.

$$H_{\text{comp}} = 1,2^{\circ}\text{C}$$

$$H_{\text{res}} = 1,5^{\circ}\text{C}$$

La selección de estos valores se realizó experimentalmente durante las pruebas de funcionamiento del sistema. Se observó que bandas de histéresis demasiado amplias producían un mayor desfase respecto a la temperatura objetivo, generando variaciones térmicas más perceptibles dentro del líquido. Por otro lado, valores de histéresis demasiado pequeños ocasionaban conmutaciones excesivamente rápidas entre los estados de encendido y apagado, aumentando considerablemente la frecuencia de accionamiento de los actuadores. Esta condición resultaba especialmente crítica para el compresor, debido a que ciclos de operación muy cortos pueden afectar su vida útil y generar condiciones de funcionamiento inestables. Debido a ello, se definieron valores de histéresis diferentes para cada sistema, buscando un equilibrio entre estabilidad térmica, precisión y protección de los componentes.

5.5.2. Control de calentamiento

El sistema de calentamiento fue desarrollado con el objetivo de incrementar la temperatura del líquido de manera gradual y estable, evitando sobrecalentamientos tanto en la resistencia calefactora como en el fluido de trabajo. Para ello, el control implementado no se limitó únicamente al encendido y apagado de la resistencia, sino que también incorporó el comportamiento del sistema de recirculación, dado que la velocidad de circulación del líquido influye directamente en la eficiencia del intercambio térmico.

Durante las pruebas iniciales, se realizaron ensayos con el PWM de la bomba peristáltica al 80 % junto con la resistencia calefactora encendida. Sin embargo, experimentalmente se observó que, bajo estas condiciones, la temperatura del líquido presentaba incrementos mínimos, mientras que la temperatura de la resistencia se mantenía relativamente estable. Este comportamiento se atribuyó a que el fluido circulaba a una velocidad excesiva a través de la cámara de calentamiento, reduciendo significativamente el tiempo de residencia dentro de la zona de transferencia térmica, además de eso, el flujo continuo del líquido actuaba como un mecanismo de disipación térmica sobre la resistencia, limitando su capacidad de alcanzar temperaturas suficientemente elevadas para transferir calor de manera efectiva al volumen total del sistema. En la siguiente imagen se muestran los resultados obtenidos en el monitor serial tras 3 minutos de encendido:

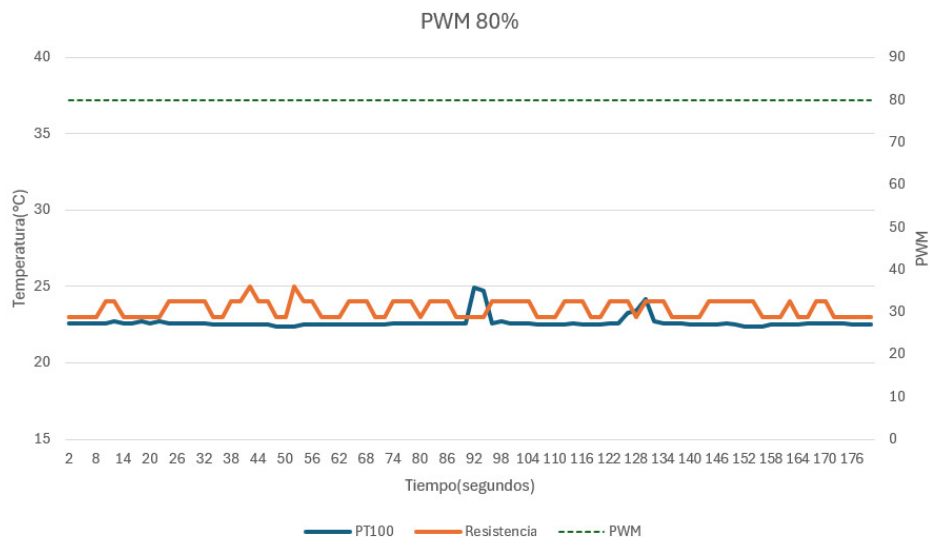


Figura 5.5.1: Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM alto.

Con el propósito de mejorar el intercambio térmico, se redujo el PWM de la bomba hasta el 30 %. Bajo estas condiciones, se observó un incremento en la temperatura de la resistencia calefactora, sin embargo, no hubo un aumento significativo en la temperatura del líquido, esto debido a la inercia térmica asociada al volumen total del sistema.

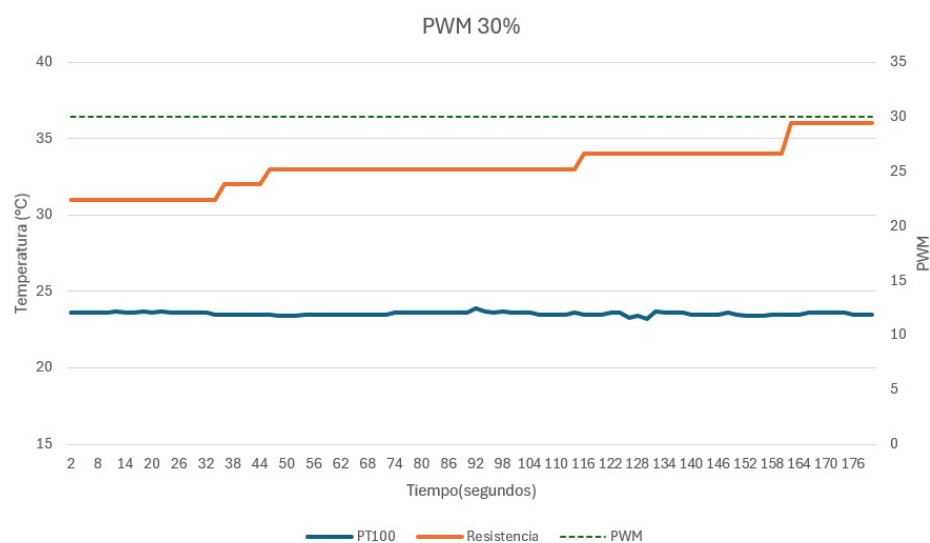


Figura 5.5.2: Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM bajo.

A partir de estas observaciones, se implementó una estrategia de control térmico pulsante basada en dos estados de operación. En el primer estado, la bomba funciona a baja velocidad, lo que permite que la resistencia eleve su temperatura y transfiera calor al pequeño volumen de líquido presente en la cámara de calentamiento. Una vez la temperatura de la resistencia supera en aproximadamente 3 °C a la temperatura del líquido, el sistema activa temporalmente un incremento en la velocidad de la bomba mediante un PWM más elevado, impulsando el fluido calentado hacia el recipiente

principal y promoviendo la homogenización térmica del sistema. Durante esta fase, la resistencia experimenta una disminución parcial de temperatura debido a la entrada de fluido más frío, tras lo cual el ciclo se repite hasta alcanzar la temperatura objetivo establecida. En la siguiente imagen se evidencia este comportamiento, donde se superponen las líneas de datos de las temperaturas:

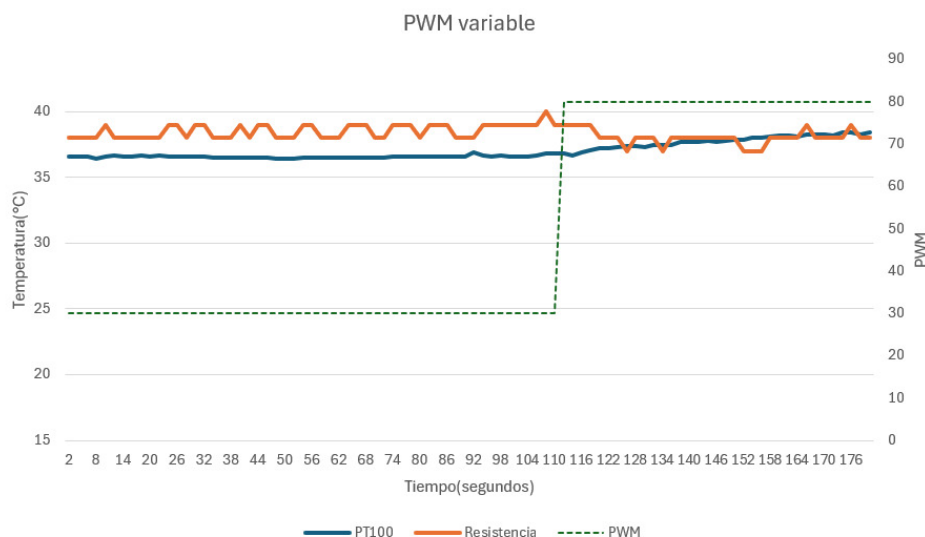


Figura 5.5.3: Gráfico que muestra comportamiento de la temperatura de la Pt100 y la resistencia con un valor de PWM variable de acuerdo con la diferencia de temperatura.

El control de encendido de la resistencia se implementó mediante una lógica ON/OFF con histéresis independiente del sistema de recirculación. Experimentalmente se determinó que una banda de histéresis excesivamente amplia generaba un mayor desfase respecto a la temperatura objetivo, mientras que bandas demasiado estrechas provocaban conmutaciones frecuentes e innecesarias del sistema.

5.5.3. Control de refrigeración

El compresor es el componente más importante del sistema de refrigeración y su función es preservar la temperatura del fluido dentro del rango operativo establecido alrededor del punto de consigna, previniendo tanto el sobreenfriamiento como la generación de ciclos de conmutación excesivos. Su control se fundamenta en una estrategia de histéresis térmica, que se complementa con limitaciones temporales de operación. Esto hace posible asegurar la estabilidad térmica y, al mismo tiempo, proteger el equipo ante condiciones de uso peligrosas.

Cuando la temperatura del fluido pasa un umbral superior a la temperatura objetivo, el compresor se activa. Este umbral incluye una compensación vinculada a la inercia térmica del sistema, de modo que no se activa inmediatamente ante cambios menores, sino solamente cuando hay una tendencia sostenida de aumento térmico. Además, el funcionamiento del compresor depende de que no haya demanda de calefacción, con lo cual se evitaría que ambos subsistemas térmicos operen al mismo tiempo, lo cual sería contradictorio desde un punto de vista físico.

Cuando se activa, el compresor sigue funcionando mientras mantenga la condición de exceso de temperatura. El sistema monitorea el tiempo total de operación a lo largo de

este periodo, lo que posibilita la inclusión de una restricción extra basada en el tiempo máximo continuo de funcionamiento. Esta restricción tiene como objetivo prevenir ciclos largos e ininterrumpidos, lo que ayuda a mantener el sistema de refrigeración estable y a proteger mecánicamente al compresor.

Cuando la temperatura del fluido cae por debajo del límite más bajo que establece la banda de histéresis, o cuando se cumple el tiempo máximo de funcionamiento continuo definido, se detiene el compresor. En los dos escenarios, la desconexión no se debe solo a factores térmicos, sino también a una táctica de seguridad operacional. Con el objetivo de impedir ciclos excesivos de encendido y apagado, así como permitir que las condiciones internas del sistema de refrigeración se estabilicen, el sistema exige después un tiempo mínimo de reposo obligatorio antes de habilitar una nueva activación.

5.5.4. Control de recirculación

El sistema de recirculación se implementó mediante una bomba peristáltica encargada de mover el fluido a través del circuito y retornarlo nuevamente al tanque principal. Su función principal es garantizar la homogeneización térmica del sistema, evitando la aparición de gradientes de temperatura entre diferentes puntos del volumen de trabajo. Durante las pruebas iniciales sin recirculación, se evidenció la presencia de zonas con temperaturas distintas dentro del sistema, lo que afectaba directamente la estabilidad del proceso, por lo que se hizo necesaria su implementación.



Figura 5.5.4: Sistema de circulación integrado y funcional.

Además de la homogenización, la recirculación también influye directamente en la dinámica térmica del sistema, ya que la velocidad del flujo modifica la rapidez con la

que se produce tanto el calentamiento como el enfriamiento. A mayores velocidades de circulación, el fluido se distribuye más rápidamente dentro del sistema, favoreciendo una transferencia de calor más uniforme; mientras que a velocidades más bajas el proceso se vuelve más lento, aunque más estable en términos de percepción térmica del sistema.



Figura 5.5.5: Líquido siendo retornado al recipiente mediante bombeo.

El control de la bomba se realiza únicamente mediante la variación del ciclo de trabajo (PWM), lo que permite ajustar de forma continua la velocidad de recirculación. En la práctica, se definieron tres rangos de operación utilizados como referencia durante la experimentación: una velocidad baja asociada a condiciones de carga térmica, una velocidad media utilizada para la estabilización del sistema y una velocidad alta empleada para acelerar la circulación cuando se requiere una respuesta más rápida del sistema.

El comportamiento de la recirculación es de tipo pulsante, ya que no se mantiene en un único estado fijo, sino que varía dinámicamente según las condiciones térmicas del sistema. En este sentido, la velocidad de la bomba aumenta progresivamente cuando el sistema requiere mayor transporte de fluido caliente hacia el tanque principal, y posteriormente disminuye cuando se busca estabilizar la temperatura del volumen total. Este ciclo se repite de forma continua durante la operación.

El cambio de velocidad está directamente relacionado con el estado térmico global del sistema. En el caso del circuito de calentamiento, la transición entre velocidades depende de las fases de operación de la resistencia. En el caso del enfriamiento, la velocidad de recirculación se ajusta en función de la necesidad de retirar calor del sistema, actuando de manera coordinada con el sistema de refrigeración, además, para evitar pérdidas térmicas debido a la longitud de las mangueras, se realiza aislamiento en todo el sistema, de esta forma también se evita condensación en zonas indeseadas.



Figura 5.5.6: Sistema de circulación aislado para evitar condensacion y perdidas térmicas.

5.5.5. Lógica general de funcionamiento

La lógica general del sistema incluye la operación de los subsistemas de recirculación, refrigeración y calentamiento, con el propósito de mantener la temperatura del fluido en un nivel constante y controlado según lo establecido por el usuario. El sistema fue diseñado como una estructura coordinada en la que cada actuador responde a condiciones térmicas específicas, pero siempre dentro de un marco común de control implementado en el microcontrolador ESP32.

La comparación continua entre la temperatura objetivo y la temperatura medida del fluido es el eje principal de la estrategia. El sistema, basándose en esta relación, establece de manera automática si es necesario extraer calor, aportar calor o simplemente estabilizar térmicamente. Si la temperatura del fluido es inferior a la consigna menos el margen de histéresis, el sistema da preferencia al proceso de calentamiento, encendiendo la resistencia y modificando la recirculación para que se optimice el traslado de energía térmica al volumen principal.

En cambio, si la temperatura del fluido excede el valor de consigna más la banda de histéresis, el sistema pone en marcha el subsistema de refrigeración a través del compresor y al mismo tiempo desactiva el sistema de calentamiento para prevenir conflictos térmicos, en esta condición, se modifica la recirculación para que sea más fácil extraer el calor y homogeneizar la temperatura en el sistema.

El sistema pasa a una etapa de estabilización cuando la temperatura está dentro del rango de histéresis, en la que ninguno de los dos subsistemas primarios controla totalmente la operación. La recirculación cobra mayor relevancia en este momento, porque posibilita que la uniformidad térmica del fluido se mantenga y que los gradientes internos disminuyan mientras el sistema va cambiando de manera paulatina hacia el punto de

equilibrio.

Además, la lógica general incluye limitaciones de seguridad que funcionan independientemente de la regulación térmica. Estas abarcan la defensa ante sobrecalentamiento en la resistencia calefactora, los límites temporales de funcionamiento del compresor y evitar que se produzcan simultáneamente situaciones de enfriamiento y calentamiento. Estas condiciones aseguran que el sistema funcione no solamente dentro de márgenes seguros para los elementos de potencia, sino también que sea estable térmicamente.

5.6. Sistema de medición

5.6.1. Implementación del Pt100

El sistema de medición de temperatura se implementó utilizando un sensor RTD Pt100 en configuración de tres hilos, con el objetivo de minimizar el error asociado a la resistencia de los conductores y mejorar la estabilidad de la medición. Este sensor fue integrado junto con el módulo MAX31865, el cual realiza la conversión de la variación de resistencia en una señal digital de temperatura mediante comunicación SPI con el microcontrolador.

El sensor se encuentra instalado en condición sumergida dentro del medio líquido, lo cual permite un acoplamiento térmico directo con el fluido y reduce los errores asociados a mediciones en superficie o en contacto indirecto. Esta configuración mejora significativamente la representatividad de la temperatura medida respecto al comportamiento real del sistema térmico.

Para facilitar la instalación y asegurar una correcta ubicación tanto del Pt100 como del termómetro patrón Fluke 52 y otros termómetros de referencia utilizados durante las pruebas, se diseñó e imprimió en 3D una tapa personalizada con orificios cilíndricos de diferentes diámetros. Esta estructura permite insertar cada instrumento de medición de forma alineada, estable y repetible, garantizando que todos los sensores se encuentren aproximadamente en la misma zona de inmersión dentro del fluido. Esta tapa ayuda a mejorar el sellado del sistema y reduce la entrada de aire, lo que contribuye a una medición más estable y representativa.

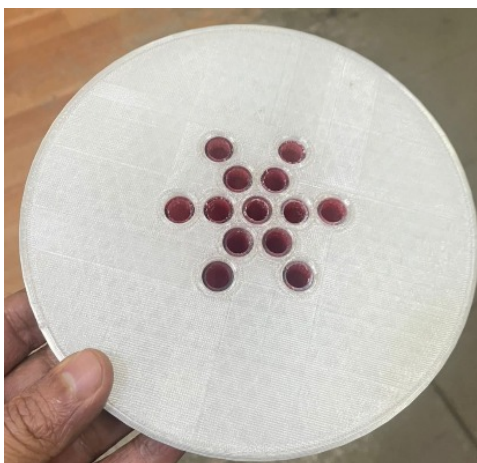


Figura 5.6.1: Tapa impresa en 3D adaptada para colocar sondas de termómetros.

En cada uno de los orificios de la tapa se instaló un tubo impreso en 3D cuya función es guiar las sondas durante su inserción. Esto evita que se desvíen hacia las paredes del recipiente y garantiza que todas queden ubicadas a la misma profundidad y con la misma separación entre sí.

En la siguiente imagen se muestra la medición de los tubos mediante una regla, donde se observa una longitud visible de 14 cm. Sin embargo, cada tubo se encuentra incrustado 1 cm dentro de los orificios de la tapa, por lo que la longitud total de cada tubo es de 15 cm.



Figura 5.6.2: Longitud de tubo impreso en 3D, mostrada con una regla.

Con el fin de garantizar condiciones adecuadas de medición para el sensor Pt100, se consideraron las dimensiones internas del recipiente y la profundidad de inmersión alcanzada durante la operación normal del sistema. En la siguiente imagen se muestran las dimensiones principales del recipiente y el nivel de líquido utilizado durante las pruebas experimentales.

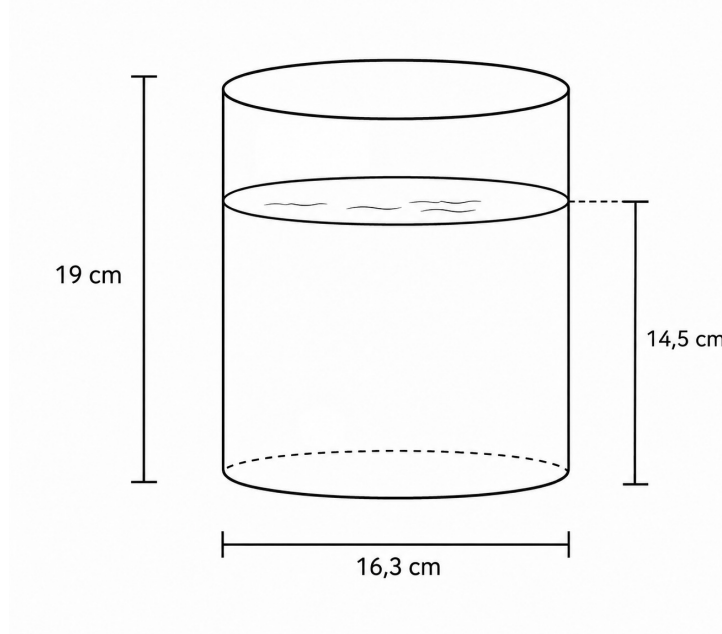


Figura 5.6.3: Imagen que muestra las medidas del recipiente y la altura del líquido con respecto a este.

A partir de la longitud útil de los tubos (14 cm) y considerando la altura de la sección del tanque que no tiene líquido, se calcula que la punta de cada tubo queda sumergida 9,5 cm por debajo de la superficie del líquido. Con lo anterior, podemos asegurarnos que al insertar una sonda Pt100 o cualquier otra sonda de temperatura de manera que su punta sobresalga del extremo inferior del tubo guía, se garantiza que el elemento sensor quede al menos 10 mm por debajo del nivel del líquido. Esta disposición cumple con la profundidad mínima de inmersión recomendada por el método (European Accreditation, 2022; Nordtest, 1994).

El sistema de adquisición trabaja con una resolución de 0.1 °C, lo que permite una adecuada sensibilidad para el control del proceso. Sin embargo, debido al ruido presente en la señal digital entregada por el módulo y el entorno de operación del sistema, se implementó un filtro digital de tipo exponencial para suavizar las lecturas y mejorar la estabilidad de la variable de control.

Este filtro actúa como un promedio ponderado entre la medición actual y la medición anterior, reduciendo las variaciones abruptas sin afectar de forma significativa la dinámica del sistema. Para ello, se utilizó un filtro exponencial discreto de primer orden, cuya ecuación está dada por:

$$T_f(k) = \alpha T_c(k) + (1 - \alpha) T_f(k - 1)$$

donde $T_f(k)$ corresponde a la temperatura filtrada actual, $T_c(k)$ representa la medición instantánea obtenida por el sensor Pt100, $T_f(k - 1)$ es la temperatura filtrada anterior y α es el coeficiente de suavizado del filtro.

En la implementación desarrollada se seleccionó un valor de $\alpha = 0,2$, obteniéndose la siguiente expresión:

$$T_f(k) = 0,2 T_c(k) + 0,8 T_f(k - 1)$$

Con esta configuración, el 20 % de la salida del filtro depende de la nueva medición adquirida, mientras que el 80 % restante corresponde al valor filtrado previo. Esto permite disminuir el efecto de pequeñas fluctuaciones y perturbaciones presentes en la señal de medición, obteniendo una lectura más estable para el sistema de control térmico.

5.6.2. Comparación con termómetro patrón Fluke

Para garantizar la confiabilidad del sistema de medición, se realizó un proceso de calibración del sensor Pt100 mediante comparación directa con un termómetro patrón Fluke 52, utilizado como referencia metrológica.

La comparación se realizó de forma continua en el tiempo, registrando simultáneamente la temperatura medida por el Pt100 y la temperatura medida por el instrumento patrón bajo las mismas condiciones de operación del sistema. Esto permitió evaluar el comportamiento del error no solo en puntos estáticos, sino también durante transiciones térmicas.

Durante las pruebas iniciales se evidenció un error aproximado de ± 1 °C en el rango de operación del sistema, tanto en condiciones de calentamiento como de estabilización. Este comportamiento indicó la presencia de un sesgo sistemático en la medición.

Tabla 5.6.1: Resultados de la comparación con termómetro Fluke y Pt100 en distintos puntos de temperatura.

Punto	Valor Pt100 (°C)	Valor patrón				Diferencia (Pt100-Patrón) (°C)
		Medición 1 (°C)	Medición 2 (°C)	Medición 3 (°C)	Medición 4 (°C)	
1	-20	-21,1	-21,5	-21,2	-21	1,2
2	-15	-15,9	-15,8	-15,8	-15,7	0,8
3	-10	-10,8	-10,9	-10,6	-10,8	0,775
4	0	-0,7	-0,9	-0,8	-0,6	0,75
5	2	1,2	1,4	1,2	1,4	0,7
6	5	4,4	4,5	4,4	4,4	0,575
7	8	7,2	7,5	7,2	7,4	0,675
8	20	19,6	19,4	19,5	19,4	0,525
9	35	34,5	34,5	34,4	34,3	0,575
10	40	39,1	39,3	39,2	39,3	0,775
11	50	49,4	49,2	49,3	49,2	0,725
12	60	59,3	59,2	59	59,1	0,85

5.6.2.1. Evaluación estadística de la correspondencia entre las mediciones

La comparación directa entre las mediciones obtenidas mediante el sistema desarrollado y las registradas por el termómetro patrón Fluke 52 permitió identificar las diferencias existentes entre ambos instrumentos a lo largo del rango de temperatura evaluado. No obstante, además de analizar los errores puntuales observados, resulta conveniente emplear herramientas estadísticas que permitan evaluar de manera global el grado de correspondencia entre ambos conjuntos de datos.

Con este propósito, se realizó un análisis de regresión lineal utilizando los valores experimentales obtenidos durante el proceso de validación, este procedimiento permite determinar la existencia de una relación lineal entre las mediciones, cuantificar la

intensidad de dicha relación y verificar la capacidad del sistema desarrollado para reproducir las variaciones de temperatura registradas por el instrumento patrón. Para lo anterior, se utiliza el dato de temperatura mostrado por la Pt100 y el promedio de las 4 temperaturas registradas con el equipo patrón:

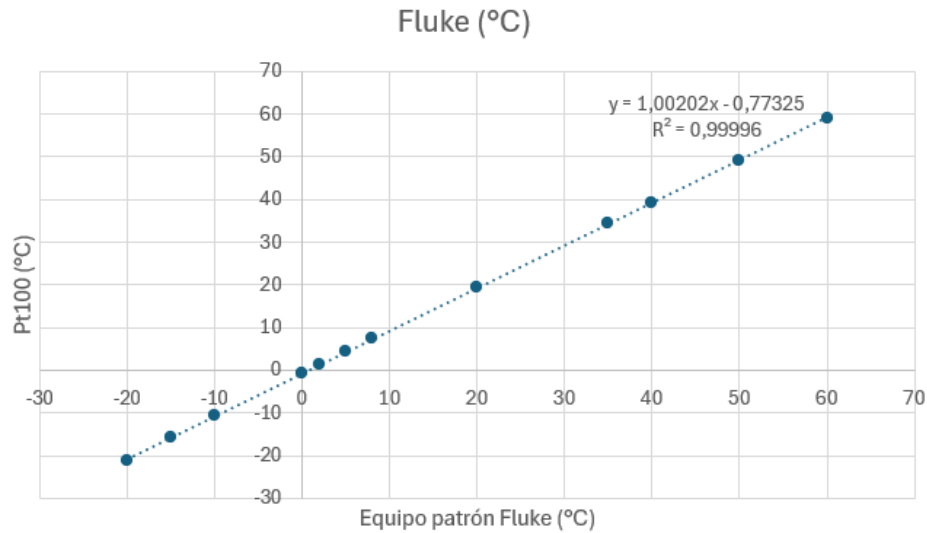


Figura 5.6.4: Correspondencia entre las mediciones del sistema desarrollado y las obtenidas mediante el termómetro patrón Fluke 52. La línea de tendencia representa el ajuste por regresión lineal realizado sobre los datos experimentales obtenidos durante la validación del sistema.

La Figura 5.6.4 muestra la relación existente entre las mediciones registradas por el sistema desarrollado y las obtenidas mediante el termómetro patrón. Como resultado del análisis, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$y = 1,00202x - 0,77325 \quad (5.6.1)$$

donde x corresponde a la temperatura indicada por el termómetro patrón Fluke 52 y y a la temperatura medida por el sistema desarrollado.

El coeficiente de determinación obtenido fue:

$$R^2 = 0,99996 \quad (5.6.2)$$

mientras que el coeficiente de correlación de Pearson calculado fue:

$$r = 0,99998 \quad (5.6.3)$$

Los resultados obtenidos evidencian una elevada correspondencia entre las mediciones de ambos instrumentos a lo largo de todo el rango de temperatura evaluado. El valor del coeficiente de determinación indica que la variabilidad observada en las mediciones del sistema desarrollado puede explicarse casi en su totalidad mediante la relación lineal establecida con el termómetro patrón. Asimismo, el coeficiente de correlación obtenido refleja una asociación lineal muy fuerte entre ambos conjuntos de datos.

La pendiente de la recta de regresión, cercana a la unidad, demuestra que el sistema reproduce de manera consistente las variaciones de temperatura registradas por el

instrumento de referencia, mientras que el intercepto obtenido indica la presencia de un sesgo reducido. Estos resultados respaldan la confiabilidad del sistema desarrollado para la medición de temperatura dentro del rango de operación evaluado.

5.6.3. Ajuste y corrección de medición

Debido a que el error identificado se comportaba de manera aproximadamente constante en todo el rango de operación, se optó por aplicar una corrección de tipo offset fijo sobre la señal medida por el Pt100.

Este ajuste permite compensar el desplazamiento sistemático observado durante la calibración, sin alterar la dinámica del sistema de medición ni afectar su respuesta temporal.

La corrección se implementa directamente en software, sumando un valor constante a la temperatura medida antes de ser utilizada por el sistema de control. Este valor fue determinado experimentalmente a partir de la comparación con el termómetro patrón Fluke 52.

Adicionalmente, sobre la señal corregida se aplica el filtro exponencial descrito anteriormente, lo que permite obtener una señal final más estable para el control del sistema térmico.

5.7. Desarrollo de la interfaz de usuario

El sistema desarrollado implementa una arquitectura de interfaz de usuario híbrida, compuesta por una interfaz local embebida basada en LCD y teclado matricial, junto con una interfaz gráfica desarrollada en Python. Esta arquitectura permite la interacción con el sistema de control térmico tanto de forma local como remota, integrando además múltiples canales de comunicación como Serial, Wi-Fi y Bluetooth. El ESP32 actúa como el núcleo de control del sistema, encargándose de la ejecución de la gestión de la comunicación con las interfaces externas.

5.7.1. Interfaz local LCD y teclado matricial

La interfaz local del sistema se implementó mediante una pantalla LCD 20x4 con comunicación I2C, la cual permite la visualización en tiempo real de las variables principales del proceso térmico. En esta se muestra la temperatura actual del sistema, la temperatura objetivo o punto de consigna, así como el estado general del sistema y los distintos menús de configuración disponibles. Además, la pantalla LCD incorpora un indicador del modo de control activo, permitiendo identificar si el sistema está siendo operado desde el teclado matricial (T), mediante conexión Wi-Fi (W) o a través de Bluetooth (B).

5.7.2. Desarrollo de la GUI

La interfaz gráfica de usuario fue desarrollada en Python utilizando las librerías PySide6 y Qt Designer, lo que permitió la construcción de una interfaz modular basada en eventos y señales. Esta interfaz actúa principalmente como un sistema de supervisión y monitoreo del proceso térmico, mientras que el control directo del sistema es ejecutado por el ESP32.

La GUI permite la visualización en tiempo real de variables críticas como la temperatura actual filtrada del sistema, la temperatura objetivo, el estado del compresor y de la resistencia, el porcentaje de PWM aplicado a la bomba peristáltica, el estado del temporizador de operación y una gráfica única del comportamiento térmico a lo largo del tiempo.

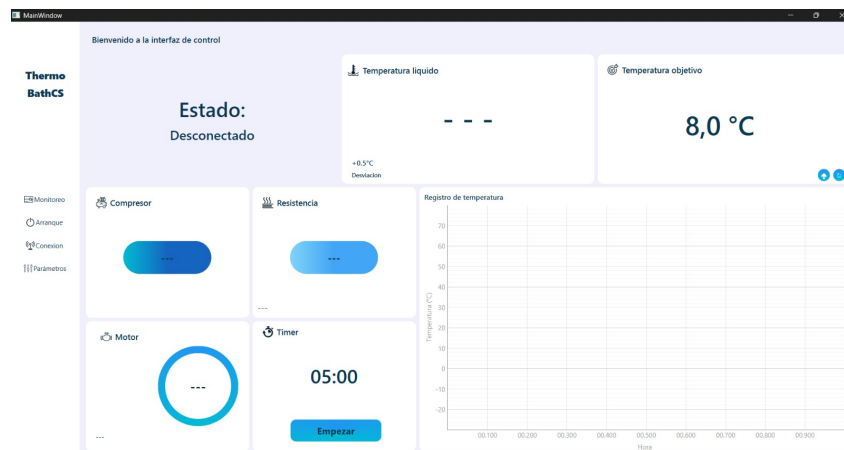


Figura 5.7.1: Pantalla principal de monitoreo de la GUI.

La interfaz tiene además una pestaña para elegir el método de conexión, el cual depende de la elección del usuario, la conexión se realizará de manera automática siempre y cuando los datos de red, IP o emparejamiento hayan sido correctamente ingresados.



Figura 5.7.2: Pantalla de selección de método de conexión.

Adicionalmente, la interfaz permite el envío de datos de configuración hacia el sistema embebido, incluyendo credenciales de red Wi-Fi, direcciones IP de dispositivos y parámetros de control. También se implementa un sistema de notificaciones que alerta al usuario ante eventos críticos como la pérdida de conexión Wi-Fi o Bluetooth, así como la finalización del temporizador de operación, permitiendo una supervisión continua del sistema.

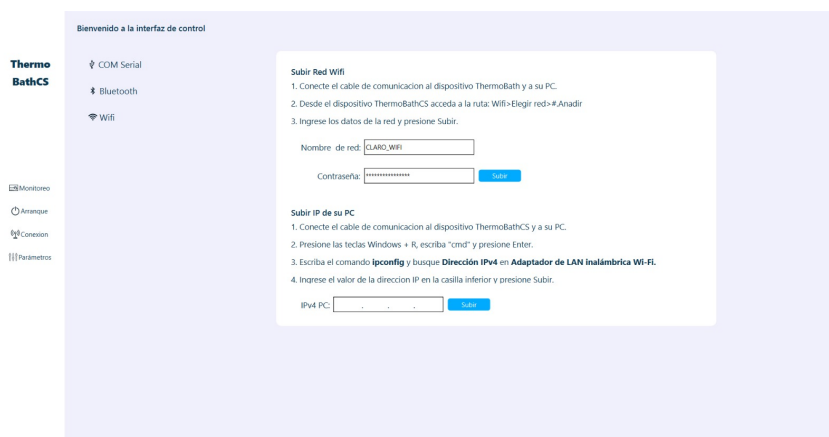


Figura 5.7.3: Pantalla de configuración de parametros de red.

5.7.3. Comunicación entre GUI y ESP32

La comunicación entre la interfaz gráfica y el sistema embebido se implementa mediante tres canales principales: comunicación serial, comunicación Wi-Fi basada en TCP/IP y comunicación Bluetooth mediante BluetoothSerial.

5.7.3.1. Comunicación Serial

La comunicación serial se utiliza principalmente como un canal de configuración inicial del sistema. A través de este enlace se transmiten parámetros críticos como el nombre de la red Wi-Fi, la contraseña de acceso y las direcciones IP de los dispositivos que serán utilizados para la comunicación remota. Este canal permite establecer la configuración base del sistema antes de activar los canales inalámbricos, garantizando una inicialización controlada del entorno de comunicación.

5.7.3.2. Comunicación Wi-Fi

La comunicación Wi-Fi constituye el canal principal de operación del sistema y se implementa mediante conexiones TCP cliente desde el ESP32 hacia computadores previamente registrados dentro de una red específica. El sistema permite almacenar múltiples redes Wi-Fi junto con sus respectivas credenciales, así como varias direcciones IPv4 asociadas a computadores autorizados para cada red. Esta información es almacenada en la memoria no volátil interna del ESP32, permitiendo conservar la configuración incluso después de reinicios o pérdidas de alimentación.

La arquitectura implementada no depende de un servidor central fijo, sino que el ESP32 realiza dinámicamente la búsqueda de equipos disponibles dentro de la red seleccionada. Para ello, el sistema mantiene una lista de direcciones IPv4 registradas manualmente mediante comunicación serial desde la interfaz gráfica. Estas direcciones corresponden a computadores que ejecutan la GUI desarrollada en Python y que pueden actuar como terminales de supervisión del sistema térmico.

Una vez seleccionada la red Wi-Fi activa, el ESP32 intenta establecer conexión TCP con cada una de las direcciones IP almacenadas hasta encontrar un dispositivo válido. Después de establecer la conexión, se ejecuta un proceso de verificación tipo handshake, en el cual el ESP32 transmite la cadena de identificación “THERMOBATH” y espera recibir la respuesta “OK” desde el computador remoto. Este mecanismo permite validar

que el equipo conectado corresponde efectivamente a la interfaz de supervisión autorizada antes de iniciar el intercambio de datos.

Tras la validación de conexión, se habilita la comunicación bidireccional mediante estructuras binarias empaquetadas. Desde el ESP32 hacia la interfaz gráfica se transmiten variables de monitoreo como la temperatura actual del sistema, el estado del compresor, el estado de la resistencia, la temperatura de la resistencia medida mediante el sensor NTC y el porcentaje de PWM aplicado a la bomba peristáltica. En sentido contrario, desde la GUI hacia el ESP32 se envían las variables de control principales, correspondientes al estado general del sistema y la temperatura objetivo o punto de consigna.

El uso de estructuras binarias reduce significativamente la carga de transmisión respecto a protocolos basados en texto, disminuyendo el consumo de recursos de procesamiento y mejorando la velocidad de intercambio de información. Adicionalmente, el sistema implementa supervisión continua del estado de conexión TCP, permitiendo detectar desconexiones de red y retornar automáticamente al modo de control local mediante teclado matricial en caso de fallo de comunicación.

En las siguientes imágenes se puede evidenciar tanto el almacenamiento de las IPs de los computadores, como la conexión mediante IP:



Figura 5.7.4: Pantalla LCD que muestra la cantidad de IPs almacenadas en la memoria de la ESP.



Figura 5.7.5: Pantalla LCD que muestra la conexión satisfactoria con el cliente vía Wi-Fi.

5.7.3.3. Comunicación Bluetooth

La comunicación Bluetooth se implementa mediante la librería `BluetoothSerial` del ESP32, operando como canal alternativo de respaldo cuando no se encuentra disponible la conexión Wi-Fi. A diferencia del sistema Wi-Fi, el Bluetooth no requiere selección de

direcciones IP ni configuración de red, ya que la conexión se establece directamente entre el ESP32 y el dispositivo emparejado bajo el nombre fijo del dispositivo “ThermoBathCS”.

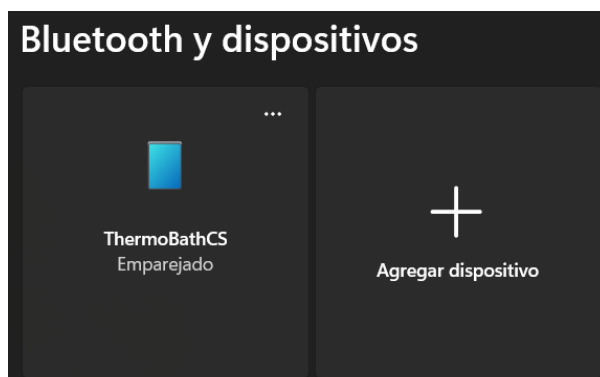


Figura 5.7.6: Dispositivo ThermoBathCS emparejado al PC.

El sistema implementa detección automática de conexión mediante la función `SerialBT.hasClient()`, lo que permite identificar en tiempo real la conexión o desconexión del cliente Bluetooth. Cuando se detecta una conexión activa, el sistema cambia automáticamente el modo de control a Bluetooth y habilita el intercambio de datos en tiempo real.

La comunicación Bluetooth también se basa en estructuras binarias empaquetadas para garantizar eficiencia en el intercambio de información. En este caso, el ESP32 recibe un paquete que contiene el estado del sistema y la temperatura objetivo, mientras que envía un paquete con la temperatura actual filtrada, el estado del compresor, el estado de la resistencia, la temperatura de la resistencia y el valor de PWM de la bomba. El intercambio se realiza de forma periódica cada dos segundos, garantizando una supervisión continua del sistema.

El sistema también incorpora un mecanismo de detección de desconexión que permite retornar automáticamente al modo de control por teclado cuando el cliente Bluetooth se desconecta, evitando estados indefinidos de operación. Este mecanismo asegura la fiabilidad del sistema frente a interrupciones de comunicación inalámbrica.

5.8. Diseño e implementación de la PCB

Se realizó una tarjeta de circuito impreso (PCB) que combina los módulos electrónicos empleados en el sistema de control térmico, con la finalidad de optimizar la organización eléctrica del sistema y disminuir el empleo de conexiones alámbricas externas. Mediante el uso de una PCB, se logró que las conexiones fueran más estables, que la distribución física de los componentes mejorara y que el procedimiento de ensamblaje del sistema en su conjunto fuera más sencillo.

El diseño electrónico del sistema y la distribución de pistas de la PCB se desarrollaron en el entorno de diseño de Proteus, considerando la integración de los módulos de control, sensores, actuadores y etapas de alimentación utilizadas en el sistema. Una vez finalizado el diseño, los archivos de fabricación fueron utilizados para la producción física de la tarjeta de circuito impreso.

5.8.1. Diseño y fabricación del PCB

El diseño esquemático del sistema fue realizado en el entorno de diseño electrónico de Proteus, donde se integraron las conexiones correspondientes al ESP32, sensores, actuadores, módulos de comunicación y etapas de potencia utilizadas en el sistema térmico. Posteriormente, se desarrolló el diseño de pistas y distribución física de componentes sobre la PCB, considerando la organización general del sistema y la compatibilidad entre los diferentes módulos electrónicos.

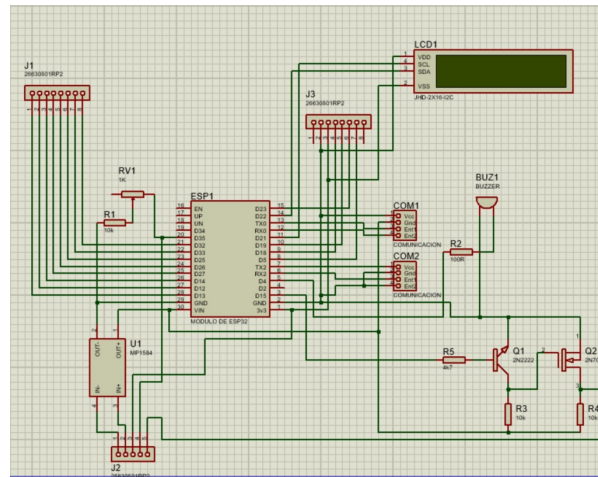


Figura 5.8.1: Diseño del circuito en proteus antes de diseñar la PCB, esto se realiza para identificar componentes y entradas.

Una vez finalizado el diseño, los archivos de fabricación de la PCB fueron enviados a una empresa especializada en manufactura de tarjetas electrónicas, encargada del proceso de producción física de la tarjeta de circuito impreso.

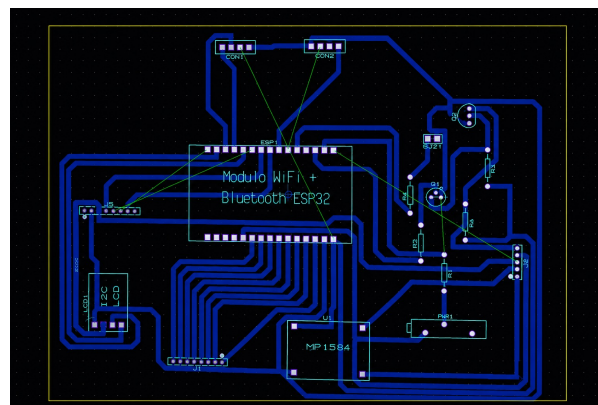


Figura 5.8.2: Diseño de la PCB en Proteus.

La fabricación de la PCB permitió reducir significativamente el uso de cableado punto a punto presente en prototipos iniciales, mejorando la robustez mecánica y la confiabilidad de las conexiones eléctricas del sistema.

5.8.2. Ensamble y soldadura

Una vez fabricada la tarjeta de circuito impreso, se procedió al montaje y soldadura manual de los diferentes componentes electrónicos utilizados en el sistema. La PCB fue desarrollada sobre una baquela de doble cara, permitiendo una mejor distribución de pistas y conexiones eléctricas, así como una mayor integración de los módulos electrónicos dentro de un espacio reducido.

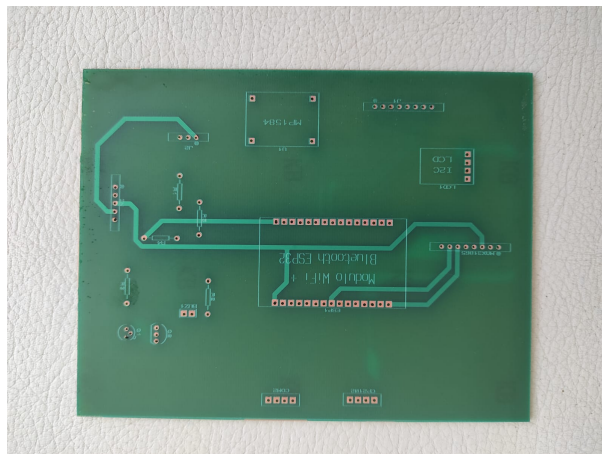


Figura 5.8.3: Cara superior de la PCB.

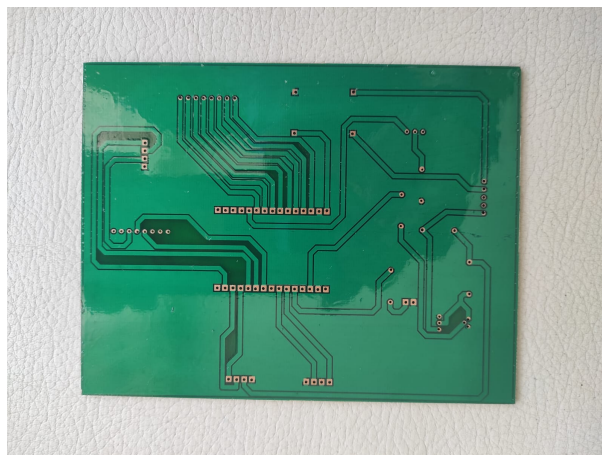


Figura 5.8.4: Cara inferior de la PCB.

Durante el proceso de ensamblaje se instalaron conectores, terminales, módulos electrónicos y dispositivos de control necesarios para la integración del sistema térmico. El montaje se realizó verificando la correcta ubicación y orientación de los componentes, especialmente en elementos de alimentación y dispositivos polarizados, con el fin de garantizar un funcionamiento adecuado y evitar fallos eléctricos durante la puesta en marcha del sistema.

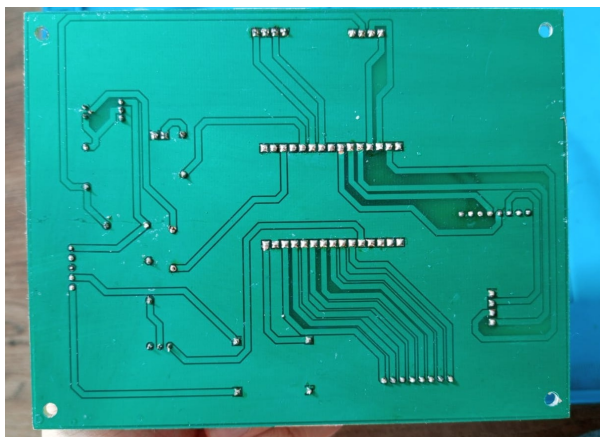


Figura 5.8.5: Imagen de la PCB con la soldadura ya realizada.

Posteriormente, se realizaron pruebas básicas de continuidad y verificación de alimentación eléctrica para comprobar el correcto funcionamiento de la tarjeta antes de su integración definitiva al sistema de control térmico.

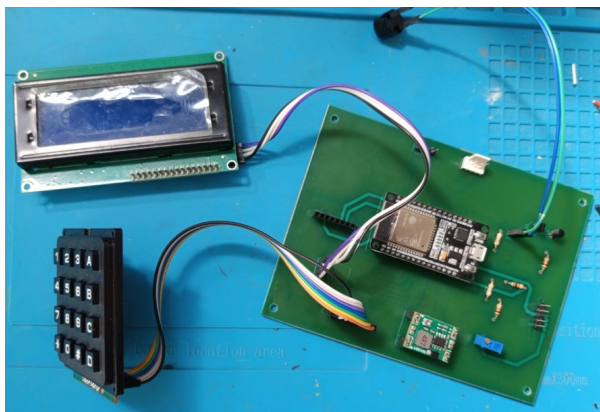


Figura 5.8.6: PCB completamente ensamblado, con todos los módulos y conexiones implementados.

5.9. Integración y pruebas de funcionamiento

Una vez finalizada la implementación de los diferentes módulos electrónicos, mecánicos y de control, se realizó la integración general del sistema térmico, unificando los subsistemas de medición, control, potencia, comunicación e interfaz de usuario dentro de una misma estructura funcional. Esta etapa permitió verificar la compatibilidad entre los diferentes componentes desarrollados y evaluar el comportamiento general del sistema durante su operación inicial.

Previo a la integración definitiva del sistema, la PCB ensamblada fue instalada dentro de una carcasa de protección, con el objetivo de mejorar la organización interna del cableado, proteger los componentes electrónicos frente a contacto accidental y proporcionar una estructura más segura para la operación del sistema. Posteriormente, se incorporaron carcasas metálicas externas para completar la estructura física del baño térmico, mejorar la presentación estética del prototipo y aumentar la robustez mecánica del sistema.

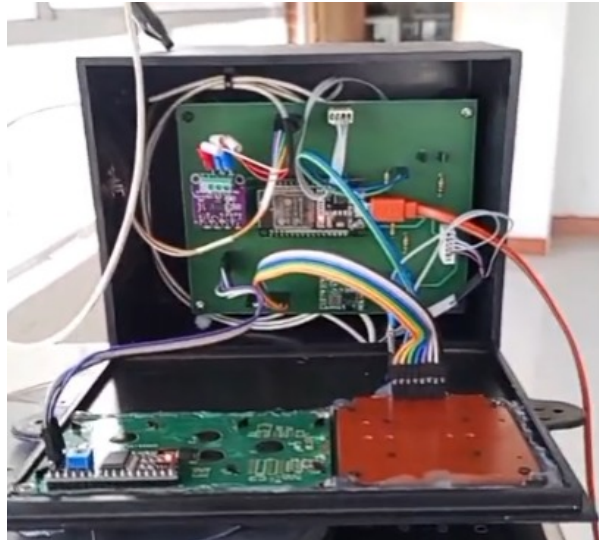


Figura 5.9.1: PCB y componentes conectados dentro de la carcasa.

La integración incluyó la conexión del sistema de adquisición de temperatura basado en el sensor Pt100, el módulo de control implementado en el ESP32, la etapa de potencia correspondiente al compresor, resistencia y bomba peristáltica, así como los módulos de comunicación Wi-Fi y Bluetooth y la interfaz gráfica desarrollada en Python.



Figura 5.9.2: Ensamble final del proyecto.

Posteriormente, se realizaron pruebas básicas de funcionamiento con el objetivo de verificar el correcto encendido del sistema, la lectura adecuada de sensores, la activación de

actuadores y la comunicación entre la GUI y el ESP32. Durante estas pruebas se comprobó el funcionamiento general de los modos de operación, la visualización de variables en la interfaz gráfica y la respuesta básica del sistema ante cambios de punto de consigna.

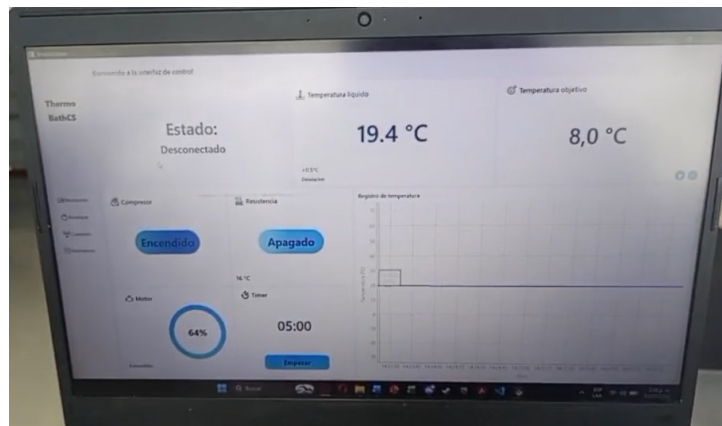


Figura 5.9.3: Fotografía de visualización de datos en GUI.

De igual forma se verificó el comportamiento general del sistema de control térmico tanto en procesos de calentamiento como de enfriamiento, observando la respuesta de los actuadores y la estabilidad básica de operación antes de realizar las pruebas experimentales finales.

Capítulo 6

Resultados y validación

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos durante la etapa de validación del baño térmico desarrollado. Se realizaron pruebas independientes sobre los sistemas de calentamiento, refrigeración, adquisición de temperatura, control térmico y comunicaciones, con el propósito de evaluar el comportamiento real del prototipo y verificar el cumplimiento de los objetivos planteados.

Las pruebas fueron efectuadas utilizando aproximadamente 4 litros de etilenglicol inhibido al 100 %, contenido dentro de un baño térmicamente aislado. Durante los ensayos, la temperatura ambiente del laboratorio se mantuvo entre 21.7 °C y 22.5 °C, con una humedad relativa cercana al 55 %.

La medición principal de temperatura fue realizada mediante un sensor Pt100 conectado al módulo MAX31865, mientras que la validación experimental se llevó a cabo utilizando un termómetro patrón Fluke como referencia externa. El sistema de control fue ejecutado mediante un ESP32 encargado de la adquisición de datos, control ON/OFF, regulación PWM y comunicaciones inalámbricas.

6.1. Integración del sistema

Finalizada la etapa de fabricación e implementación electrónica, se realizó el ensamblaje completo de todos los subsistemas desarrollados. El sistema quedó conformado por:

- Sistema de refrigeración mediante compresor doméstico.
- Sistema de calefacción mediante resistencia térmica.
- Sistema de circulación mediante bomba PWM.
- Sistema de adquisición de temperatura Pt100.
- Interfaz LCD con teclado matricial.
- Comunicación Bluetooth y Wi-Fi.
- Interfaz gráfica desarrollada en Python.

La PCB principal fue instalada dentro de una carcasa protectora con el fin de mejorar la organización del cableado, aumentar la seguridad eléctrica y proporcionar una mejor presentación general del sistema.

Posteriormente se realizaron las conexiones finales entre sensores, actuadores y módulos de comunicación, verificando el correcto funcionamiento de cada subsistema antes de iniciar las pruebas experimentales.

Durante las pruebas iniciales se comprobó el funcionamiento adecuado de:

- Lectura de temperatura.
- Activación de relés.
- Control PWM.
- Navegación entre menús.
- Comunicación serial.
- Conectividad Bluetooth y Wi-Fi.

No se presentaron fallos críticos durante la integración final del sistema.

6.2. Validación del sistema de medición

6.2.1. Comparación del Pt100 con el termómetro patrón

Con el propósito de validar el sistema de adquisición implementado, se realizaron comparaciones entre las mediciones obtenidas mediante el sensor Pt100 y un termómetro patrón Fluke utilizado como referencia.

Las pruebas fueron efectuadas en diferentes condiciones de operación, incluyendo calentamiento, refrigeración y congelación, utilizando múltiples puntos de consigna distribuidos dentro del rango térmico de operación del sistema.

La Tabla 6.2.1 resume los principales resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de validación, incluyendo el error máximo observado respecto al instrumento patrón y el tiempo aproximado requerido para alcanzar estabilidad térmica en cada punto evaluado.

Tabla 6.2.1: Desempeño térmico experimental del sistema

Consigna [°C]	Error máximo [°C]	Tiempo de estabilización [min]
-20	1.20	91
-15	0.80	80
-10	0.775	73
0	0.75	54
2	0.70	49
5	0.575	41
8	0.675	35
35	0.575	27
40	0.775	36
50	0.725	53
60	0.85	68

Los resultados mostraron una adecuada concordancia entre las mediciones obtenidas mediante el Pt100 y el termómetro patrón Fluke, observándose diferencias relativamente

pequeñas en la mayoría de los puntos evaluados. Sin embargo, se identificaron algunos comportamientos no lineales asociados principalmente a las limitaciones térmicas del sistema, la resolución del proceso de adquisición y las variaciones producidas durante transiciones rápidas de temperatura.

Adicionalmente, se observó que el sistema presenta un mejor desempeño térmico en temperaturas cercanas al ambiente, donde se obtuvieron menores tiempos de estabilización y errores reducidos. En contraste, los extremos térmicos presentaron mayores tiempos de respuesta y errores más elevados debido a las pérdidas térmicas hacia el ambiente y a las limitaciones físicas propias del sistema de refrigeración implementado.

La estabilidad temporal de la temperatura, evaluada mediante el termómetro patrón, presentó oscilaciones aproximadas de $\pm 0,3$ °C alrededor del punto de consigna durante intervalos cercanos a 4 minutos, indicando un comportamiento estable para las condiciones de operación evaluadas experimentalmente.

6.2.2. Uniformidad térmica del baño

Con el fin de evaluar la uniformidad térmica del baño, se realizaron mediciones en diferentes puntos del líquido utilizando el termómetro patrón Fluke, manteniendo inicialmente una profundidad de inmersión similar en todas las posiciones evaluadas.

La Figura 6.2.1 muestra la distribución aproximada de los puntos utilizados durante la evaluación experimental de uniformidad térmica dentro del baño.

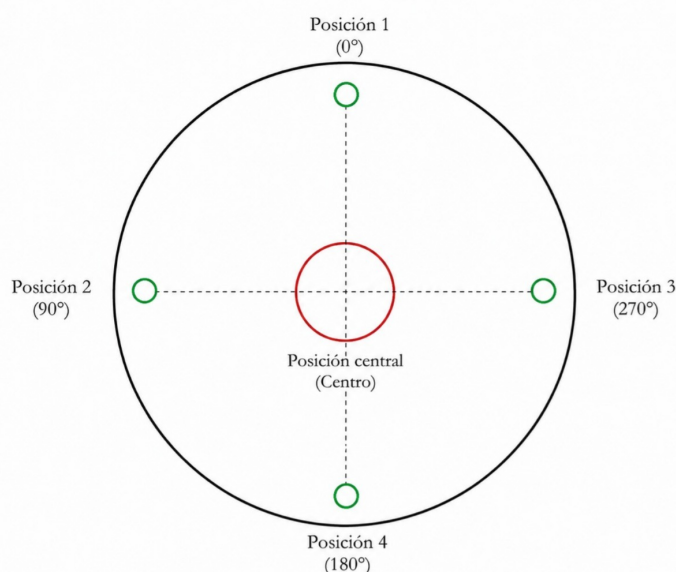


Figura 6.2.1: Diagrama que muestra las posiciones en que se coloca el termómetro fluke para medir uniformidad.

La Tabla 6.2.2 presenta los errores observados experimentalmente durante una prueba realizada a una temperatura de consigna cercana a 8 °C.

Tabla 6.2.2: Evaluación experimental de uniformidad térmica a 8 °C

Posición de medición	Valor medido [°C]	Error [°C]
Centro	8.1	0.1
Esquina 1	7.7	-0.3
Esquina 2	7.8	-0.2
Esquina 3	7.7	-0.3
Esquina 4	7.6	-0.4
Centro superior	8.3	0.3
Esquina superior 1	8.8	0.8
Esquina superior 2	8.9	0.9
Esquina superior 3	8.7	0.7
Esquina superior 4	8.8	0.8

Los resultados obtenidos mostraron una distribución térmica considerablemente más uniforme en la región central del baño, donde las variaciones permanecieron aproximadamente entre 0.1 °C y 0.4 °C respecto al punto de referencia.

Sin embargo, al desplazar la sonda hacia zonas cercanas a la superficie del líquido y a las paredes del recipiente, se observaron desviaciones considerablemente mayores, alcanzando valores cercanos a 0.9 °C. Este comportamiento se atribuye principalmente a la presencia de gradientes térmicos superficiales y a la proximidad del serpentín de cobre utilizado en el sistema de refrigeración, el cual produce zonas localizadas de menor temperatura.

Experimentalmente también se observó que las menores desviaciones se obtenían en regiones alejadas de la superficie y más cercanas al centro del volumen de trabajo, indicando que la circulación generada por la bomba favorece una transferencia térmica más homogénea en dicha zona.

Los resultados observados coinciden con las recomendaciones establecidas en el método Nordtest para baños termostáticos de calibración, donde se recomienda mantener profundidades adecuadas de inmersión con el fin de reducir errores asociados a gradientes térmicos superficiales y mejorar la estabilidad de las mediciones (Nordtest, 1994).

6.2.3. Estabilidad de lectura y filtrado digital

Durante las primeras pruebas se observaron pequeñas fluctuaciones en las lecturas entregadas por el módulo MAX31865, principalmente debido al ruido eléctrico presente en el sistema y a pequeñas perturbaciones generadas durante el proceso de adquisición.

Con el objetivo de mejorar la estabilidad de las mediciones, se implementó un filtro digital exponencial sobre las lecturas obtenidas mediante el sensor Pt100.

La implementación del filtro permitió suavizar variaciones rápidas presentes en la señal sin afectar significativamente el tiempo de respuesta general del sistema. La Figura 6.2.2 muestra el comportamiento de la señal antes y después de aplicar el filtrado digital.

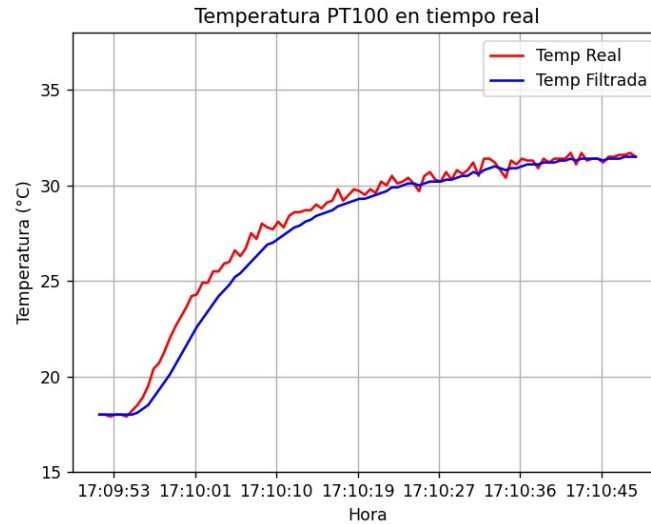


Figura 6.2.2: Comparación entre la señal original y la señal filtrada mediante filtro digital exponencial.

Como puede observarse, el filtrado digital reduce considerablemente las oscilaciones rápidas presentes en la señal original, obteniéndose una lectura más estable y adecuada para el sistema de control térmico implementado.

Adicionalmente, durante las pruebas experimentales se evaluó el comportamiento temporal del sistema alrededor del punto de consigna, observándose oscilaciones comprendidas aproximadamente entre $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto al valor objetivo durante intervalos cercanos a 3.5 minutos.

La Tabla 6.2.3 presenta una muestra representativa de las mediciones obtenidas durante un intervalo de estabilidad térmica, registradas cada 10 segundos alrededor de una consigna de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 6.2.3: Variación térmica del sistema en estado estable

Muestra	Tiempo [s]	Temperatura medida [°C]	Error [°C]
1	0	7.8	-0.2
2	10	7.9	-0.1
3	20	8.0	0.0
4	30	8.1	0.1
5	40	8.2	0.2
6	50	8.1	0.1
7	60	8.0	0.0
8	70	7.9	-0.1
9	80	8.2	0.2
10	90	8.3	0.3
11	100	8.1	0.1
12	110	8.0	0.0
13	120	7.9	-0.1
14	130	8.2	0.2
15	140	8.1	0.1
16	150	8.0	0.0
17	160	7.8	-0.2
18	170	8.1	0.1
19	180	8.2	0.2
20	190	8.0	0.0
21	200	8.0	0.0

El análisis estadístico realizado sobre estas mediciones evidenció una desviación estándar aproximada de 0.14 °C, indicando una dispersión reducida y un comportamiento térmico estable durante la operación continua del sistema.

Las variaciones observadas se encuentran asociadas principalmente a la resolución del sistema de adquisición, la estrategia de control ON/OFF implementada, el mecanismo de recirculación de líquido y las perturbaciones térmicas presentes en el entorno experimental.

El comportamiento obtenido facilitó además la visualización de datos en la interfaz gráfica y redujo activaciones innecesarias de los actuadores.

6.3. Pruebas de calentamiento

El objetivo de esta prueba fue evaluar la capacidad del sistema para incrementar y mantener la temperatura del baño térmico en diferentes valores de referencia.

Las principales pruebas de calentamiento fueron realizadas utilizando puntos de consigna de 35 °C, 37 °C y 40 °C. Adicionalmente, se evaluó el límite máximo alcanzable por el sistema.

6.3.1. Metodología

- Temperatura inicial aproximada: 22 °C.
- Fluido utilizado: etilenglicol inhibido.

- Volumen aproximado: 4 L.
- Sistema operando en modo automático.

6.3.2. Resultados

Durante las pruebas, el sistema logró alcanzar temperaturas cercanas a 65 °C, límite asociado principalmente a la potencia de la resistencia implementada, aproximadamente 500 W.

El tiempo requerido para alcanzar la temperatura máxima fue cercano a 75 minutos.

A lo largo del calentamiento se observó un incremento progresivo y estable de la temperatura del líquido, sin sobreoscilaciones importantes ni sobrecalentamientos críticos.

La bomba de circulación permaneció activa durante toda la operación, mientras que el sistema PWM modificó automáticamente la velocidad de circulación según las necesidades térmicas del proceso.

6.3.3. Análisis

El sistema presentó un comportamiento estable durante todas las pruebas de calentamiento.

La estrategia ON/OFF con histéresis permitió reducir conmutaciones rápidas de la resistencia, mientras que el control PWM favoreció una transferencia térmica más uniforme entre la resistencia y el líquido.

La limitación observada alrededor de 65 °C se atribuye principalmente a la potencia de calefacción disponible y a las pérdidas térmicas del sistema.

6.4. Pruebas de refrigeración y congelación

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de refrigeración, se realizaron pruebas utilizando diferentes temperaturas objetivo.

Los principales puntos de consigna evaluados fueron:

- 8 °C
- 5 °C
- 2 °C
- -5 °C
- -10 °C
- -20 °C

6.4.1. Resultados

Para temperaturas cercanas a 5 °C, el sistema logró alcanzar el punto de consigna en aproximadamente 40 minutos.

En las pruebas de congelación, el baño alcanzó temperaturas mínimas cercanas a -23 °C en aproximadamente 95 minutos.

El compresor doméstico utilizado presentó un funcionamiento estable durante las pruebas, activándose y desactivándose de acuerdo con la lógica de control implementada.

También se observó que en varias ocasiones el compresor alcanzó el tiempo máximo continuo de funcionamiento definido por software, apagándose temporalmente para permitir periodos de protección mecánica.

Durante una prueba experimental adicional, se evaluó el comportamiento del baño termostático utilizando seis termómetros clínicos simultáneamente. Para esta prueba se estableció una temperatura de consigna de 8 °C y, tras aproximadamente 35 minutos de estabilización, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 6.4.1.



Figura 6.4.1: Termómetros ubicados dentro del baño termostático para evaluar temperatura.

6.4.2. Análisis

El sistema de refrigeración mostró un comportamiento adecuado durante todas las pruebas realizadas.

La lógica de histéresis permitió evitar ciclos excesivos de encendido y apagado del compresor, contribuyendo a reducir el desgaste mecánico y mejorar la estabilidad térmica.

Adicionalmente, el aislamiento térmico del baño favoreció la conservación de las bajas temperaturas alcanzadas.

6.5. Validación del control térmico

Las pruebas experimentales realizadas permitieron validar el funcionamiento general de la estrategia de control térmico implementada en el baño termostático desarrollado.

Durante los ensayos se observó un comportamiento estable tanto en los procesos de calentamiento como de refrigeración, permitiendo alcanzar diferentes puntos de consigna dentro del rango de operación establecido experimentalmente.

Los resultados obtenidos mostraron que:

- El sistema evitó activaciones simultáneas de calefacción y refrigeración.

- La histéresis redujo conmutaciones rápidas de relés y compresor.
- El PWM permitió modificar dinámicamente la velocidad de circulación.
- El sistema mantuvo estabilidad térmica durante operación continua.
- La baja dispersión observada entre las mediciones sugiere una transferencia térmica relativamente uniforme dentro del volumen de trabajo.

Experimentalmente se determinó que el PWM mínimo funcional de la bomba corresponde al 30 %, ya que valores inferiores provocan la detención total de la circulación del fluido.

Por otra parte, aunque la bomba puede operar hasta el 100 % de velocidad, se observó que velocidades superiores al 80 % producen una circulación excesiva e innecesaria, incrementando la turbulencia del fluido sin mejoras significativas en la uniformidad térmica.

Las pruebas de estabilidad y uniformidad permitieron evidenciar que el mejor desempeño térmico se obtenía en la región central del baño y a profundidades alejadas de la superficie, donde las variaciones térmicas fueron considerablemente menores, además, las mayores desviaciones se presentaron cerca de las paredes y zonas próximas al serpentín de refrigeración, debido a gradientes térmicos locales producidos por transferencia de calor no uniforme.

Sumado a lo anterior, se observó que el sistema presenta un mejor comportamiento térmico en temperaturas cercanas al ambiente, mientras que los extremos del rango de operación presentaron mayores tiempos de estabilización y errores más elevados, principalmente debido a pérdidas térmicas hacia el entorno y limitaciones físicas del sistema de refrigeración implementado.

6.5.1. Estimación experimental de incertidumbre

Con el propósito de estimar el desempeño metrológico global del sistema desarrollado, se realizó una estimación experimental de incertidumbre considerando las principales fuentes de error presentes durante las pruebas de validación térmica.

Las contribuciones consideradas incluyen la resolución del sistema de adquisición, la exactitud del termómetro patrón utilizado como referencia, la estabilidad térmica observada experimentalmente, la uniformidad espacial del baño y las limitaciones asociadas al sensor Pt100 junto al módulo MAX31865 utilizado para la adquisición de temperatura.

La Tabla 6.5.1 resume las contribuciones consideradas durante el cálculo de incertidumbre combinada.

Tabla 6.5.1: Contribuciones consideradas en la estimación experimental de incertidumbre

Fuente de incertidumbre	Valor [°C]	Incertidumbre estándar [°C]
Resolución del sistema	0.1	0.029
Exactitud del Fluke 52	0.3	0.173
Estabilidad térmica	0.3	0.300
Uniformidad térmica	0.65	0.375
Pt100 + MAX31865	0.2	0.115

La incertidumbre asociada a la resolución del sistema fue calculada considerando una distribución rectangular sobre la resolución mínima observable de 0.1 °C, utilizando la ecuación 6.5.1.

$$u_{res} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} \quad (6.5.1)$$

La incertidumbre asociada al termómetro patrón Fluke 52 se estimó a partir de una exactitud aproximada de ± 0.3 °C, asumiendo distribución rectangular, según la ecuación 6.5.2.

$$u_{ref} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} \quad (6.5.2)$$

La contribución asociada a estabilidad térmica se obtuvo experimentalmente a partir de las oscilaciones observadas alrededor del punto de consigna durante intervalos cercanos a 4 minutos, donde se registraron variaciones aproximadas de ± 0.3 °C.

$$u_{est} = 0,3 \quad (6.5.3)$$

La incertidumbre asociada a uniformidad térmica fue estimada utilizando el semirango experimental observado durante las pruebas de distribución espacial de temperatura. Considerando un rango aproximado entre -0.4 °C y 0.9 °C, se obtuvo un semirango de 0.65 °C. Asumiendo distribución rectangular:

$$u_{uni} = \frac{0,65}{\sqrt{3}} \quad (6.5.4)$$

Finalmente, la contribución asociada al sensor Pt100 y al módulo MAX31865 fue estimada considerando las tolerancias típicas del sensor clase A y los errores asociados al proceso de adquisición electrónica.

$$u_{sens} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \quad (6.5.5)$$

La incertidumbre combinada fue calculada mediante el método de raíz de suma de cuadrados (RSS), según la ecuación 6.5.6.

$$u_c = \sqrt{u_{res}^2 + u_{ref}^2 + u_{est}^2 + u_{uni}^2 + u_{sens}^2} \quad (6.5.6)$$

Donde:

- u_{res} : contribución asociada a la resolución del sistema.
- u_{ref} : contribución asociada al termómetro patrón Fluke 52.
- u_{est} : contribución asociada a la estabilidad térmica observada.
- u_{uni} : contribución asociada a la uniformidad térmica del baño.
- u_{sens} : contribución asociada al sensor Pt100 y al módulo MAX31865.

Sustituyendo los valores experimentales obtenidos:

$$u_c = \sqrt{(0,029)^2 + (0,173)^2 + (0,300)^2 + (0,375)^2 + (0,115)^2} \quad (6.5.7)$$

Obteniéndose una incertidumbre combinada aproximada de:

$$u_c \approx 0,53 \text{ } ^\circ C \quad (6.5.8)$$

Finalmente, utilizando un factor de cobertura $k = 2$, se estimó una incertidumbre expandida aproximada según la ecuación 6.5.9.

$$U = 2u_c \quad (6.5.9)$$

Reemplazando el valor de incertidumbre combinada calculado:

$$U \approx \pm 1,06 \text{ } ^\circ C \quad (6.5.10)$$

Los resultados obtenidos muestran que las principales contribuciones de incertidumbre provienen de la uniformidad térmica del baño y de la estabilidad observada durante la operación continua del sistema, las mayores desviaciones aparecen principalmente en regiones cercanas a la superficie del líquido y próximas al serpentín de refrigeración, donde existen gradientes térmicos más pronunciados.

Conclusiones

- Se logró definir e integrar los requerimientos térmicos, electrónicos y funcionales necesarios para el desarrollo de un baño termostático destinado a la verificación y calibración de termómetros, permitiendo establecer una arquitectura de control adecuada para las necesidades del proyecto. La selección de componentes como el sensor Pt100, el sistema de calentamiento, el módulo de adquisición y el sistema de recirculación permitió construir un prototipo capaz de operar de manera estable y segura. Asimismo, el diseño fue orientado hacia una operación sencilla e intuitiva, facilitando la interacción del usuario mediante una interfaz clara y de fácil comprensión, lo que mejora las condiciones de uso durante los procesos de medición y calibración.
- El diseño e implementación del sistema de control basado en una estrategia ON/OFF con histéresis permitió mantener la temperatura del líquido dentro de rangos de estabilidad adecuados para aplicaciones de verificación térmica. Durante las pruebas realizadas se evidenció una estabilidad aproximada de ± 0.1 °C en intervalos cortos de operación y variaciones máximas cercanas a ± 0.3 °C en periodos más prolongados, lo cual demuestra un comportamiento térmico estable del sistema. Adicionalmente, la incorporación del sistema de recirculación contribuyó significativamente a mejorar la uniformidad térmica del líquido y el control dinámico de la temperatura, ya que al forzar la convección se logró regular la velocidad de enfriamiento del sistema sin depender únicamente de la activación o desactivación de los actuadores de calentamiento. Aunque el sistema no alcanzó completamente el rango máximo planteado inicialmente de 70 °C, logrando temperaturas cercanas a 63 °C y 65 °C, el desempeño obtenido fue satisfactorio para validar el funcionamiento general del prototipo y la efectividad del método de control implementado.
- La evaluación experimental del baño termostático permitió validar su funcionamiento mediante la comparación de las mediciones obtenidas con un termómetro patrón de referencia, evidenciando la importancia de los procesos de calibración y corrección del sistema de medición. La aplicación de ajustes sobre las lecturas del sensor Pt100 permitió reducir diferencias respecto al valor real de temperatura, mejorando la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas dentro del baño térmico. De igual manera, el desarrollo del proyecto permitió aplicar e integrar conocimientos relacionados con metrología, automatización, control automático, electrónica y adquisición de datos, demostrando la viabilidad de implementar soluciones térmicas funcionales mediante tecnologías accesibles y estrategias de control relativamente simples, pero efectivas para aplicaciones de laboratorio y verificación térmica.

- Las pruebas experimentales permitieron identificar tanto las capacidades como las limitaciones del prototipo desarrollado en comparación con las recomendaciones presentes en métodos utilizados para baños termostáticos de calibración, como el método Nordtest. Experimentalmente se observó que las menores desviaciones térmicas se obtenían en la región central del baño y a profundidades alejadas de la superficie, mientras que las mayores variaciones aparecían cerca de las paredes y del serpentín de refrigeración debido a la presencia de gradientes térmicos locales.
- Aunque el sistema presentó variaciones de uniformidad y una incertidumbre expandida superiores a las observadas en baños termostáticos metrológicos de alta precisión, los resultados obtenidos son coherentes con las limitaciones físicas y constructivas del sistema implementado, especialmente considerando el uso de refrigeración doméstica, control ON/OFF y componentes de bajo costo. No obstante, el comportamiento térmico alcanzado demuestra que el prototipo puede ser utilizado como una herramienta funcional para procesos de validación comparativa, verificación experimental y evaluación térmica de instrumentos clínicos y biomédicos, también se identificaron posibles mejoras futuras relacionadas con el incremento de la potencia de circulación, la optimización geométrica del sistema de refrigeración y la implementación de estrategias de control más avanzadas, las cuales podrían contribuir significativamente a mejorar la uniformidad, estabilidad e incertidumbre global del sistema.

Referencias

- Acortes Software. (2022). Proyecto 16 – Termistor NTC 10K [Consultado: 2026-02-16]. <https://acortes.co/proyecto-16-termistor-ntc-10k/>
- Adafruit Industries. (2026). Adafruit MAX31865 RTD PT100/PT1000 Amplifier - Pinouts [Consultado: 2026-05-15]. <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/pinouts>
- Aranda, J., & Merlone, A. (2023). On-Site Calibration Procedure and Uncertainty Contributions on Air Temperature Sensors. *Measurement*.
- AV Electronics. (2026). Convertidor de Voltaje DC-DC Step Down 3A [Consultado: 2026-02-16]. https://www.construex.com.ec/exhibidores/av_electronics/producto/convertidor_voltaje_dc_dc_step_down_3_a_2
- Cengel, Y. A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach* (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- Ding, X., et al. (2021). Temperature Control System of Medical Instrument Based on Dual Threshold Hysteresis Comparison Circuit. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Electronilab. (2026a). Buzzer Activo 5V – Zumbador 12×9.5mm [Consultado: 2026-02-16]. https://electronilab.co/tienda/buzzer-activo-5v-zumbador/?srsltid=AfmBOoqCmbz7aX5vntcqT0lCjq1CHMsoYIzwUKzf7dt_MCTVv8UVCTYQ
- Electronilab. (2026b). Teclado Matricial 4x4 de Botones (16 Dígitos) [Consultado: 2026-02-16]. <https://electronilab.co/tienda/teclado-matricial-4x4-de-botones-16-digitos/?srsltid=AfmBOoo0CVO5NFwYwlKaHf87Uv6N6vX8ldhi4m3Revf5P9twM9ZpKFTS>
- Electronilab. (n.d.). Módulo sensor de temperatura MAX31865 amplificador RTD [Consultado: 2026-02-16]. <https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-temperatura-max31865-amplificador-rtd/>
- Espressif Systems. (n.d.). ESP32-DevKitC-S1 Development Board [Consultado: 2026-02-16]. <https://co.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-DevKitC-S1>
- European Accreditation. (2022). *Specific Guidance for Calibration Laboratories in the Field of Temperature* (inf. téc.). European Accreditation.
- ISO17025. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (inf. téc.). International Organization for Standardization.
- JA-Bots. (2024). Módulo CP2102 conversor USB a serial TTL [Consultado: 2026-02-16]. <https://ja-bots.com/producto/modulo-cp2102-conversor-usb-a-serial-ttl/>
- Kamoer Fluid Tech. (n.d.). Micro Peristaltic Pump Product Information [Consultado: 2026-02-16]. <https://www.kamoer.com/us/product/detail.html?id=10017>
- Manikandan, R., et al. (2024). The Advantages of Adopting the ISO/IEC 17025:2017 Lab Management System in Calibration and Testing. *International Journal of Quality*.

- Nordtest. (1994). *Thermometers, contact, direct reading: Calibration* (inf. téc. N.º NT VVS 103). Nordtest.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5.ª ed.). Pearson.
- Osaka Electronics Ltda. (2024). Módulo I2C LCD Arduino [Consultado: 2026-02-16]. <https://osakaelectronicsltda.com/modulos-robotica/modulos-varios/modulo-i2c-lcd-arduino.html>
- Panagiotidou, S. y. o. (2025). Systematic Identification and Validation of Critical Success Factors for ISO/IEC 17025 Implementation. *Administrative Sciences*.
- PCC Group. (s.f.). Propiedades y usos del etilenglicol [Consultado: 2026-02-16].
- PT100 ATEX. (2024). PT100 temperature probe [Consultado: 2026-02-16].
- Saint-Gobain. (n.d.). PharMed® BPT Tubing [Consultado: 2026-02-16]. <https://www.medical.saint-gobain.com/tubing/thermoplastic-tubing/pharmed-bpt-tubing>
- Sigma Electrónica. (2026). Relé de Estado Sólido SSR-25DA 25A [Consultado: 2026-02-16]. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/ssr-25da/>
- Wang, H., & Wu, Y. (2020). A Method to Increase the Frequency Stability of a TCXO by Compensating Thermal Hysteresis. *Sensors*.
- Zamux Electrónica. (2024). Pantalla Display LCD 4x20 Azul con Backlight [Consultado: 2026-02-16]. <https://www.zamux.co/pantalla-display-lcd-4x20-azul-con-backlight>
- Zamux Electrónica. (2026). Fuente Conmutada de Voltaje 12V 10A 120W DC [Consultado: 2026-02-16]. <https://www.zamux.co/fuente-conmutada-de-voltaje-12v-10a-120w-dc>