



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CHILLER PARA  
TERAPIA DE INMERSIÓN EN FRÍO CON CONTROL Y  
SUPERVISIÓN REMOTA POR PLC VÍA INTERNET**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero en Mecatrónica

Autores: Jam Michele Sánchez Loaiza  
Luis Santiago Arana Ramos  
Tutor: Christopher Ruben Reyes López

Guayaquil - Ecuador  
2025

19-02-2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Jam Michele Sánchez Loaiza** con documento de identificación N° **0924858442** y **Luis Santiago Arana Ramos**, con documento de identificación N° **0950485037**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Jam Michele Sánchez Loaiza  
0924858442



---

Luis Santiago Arana Ramos  
0950485037

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Jam Michele Sánchez Loiza** con documento de identificación N° **0924858442** y **Luis Santiago Arana Ramos** con documento de identificación N° **0950485037**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CHILLER PARA TERAPIA DE INMERSIÓN EN FRIO CON CONTROL Y SUPERVISIÓN REMOTA POR PLC VÍA INTERNET**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del 2026

Atentamente,



Jam Michele Sánchez Loiza  
0924858442



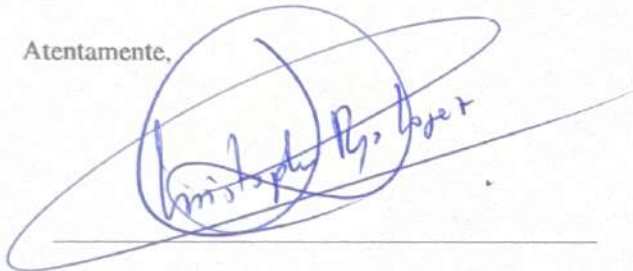
Luis Santiago Arana Ramos  
0950485037

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Christopher Rubén Reyes López**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CHILLER PARA TERAPIA DE INMERSIÓN EN FRIO CON CONTROL Y SUPERVISIÓN REMOTA POR PLC VÍA INTERNET**, realizado por **Jam Michele Sanchez Loaiza** con documento de identificación N° **0924858442** y por **Luis Santiago Arana Ramos** con documento de identificación N° **0950485037**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Christopher Rubén Reyes López, MSc.  
0923848691

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo, antes que nada, a mis padres, Jean Michael Sánchez y Olga Isabel Loaiza. Gracias por estar conmigo desde el inicio, por creer en mí incluso antes de que yo tuviera claro hasta dónde podía llegar. Su apoyo incondicional, su confianza y su presencia constante fueron un sostén silencioso pero firme durante toda esta etapa. Cada paso dado en esta carrera tuvo detrás su respaldo, su paciencia y su amor, y eso hizo posible que nunca caminara solo.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi abuelito Walter Sánchez Parrales, cuyo legado permanece más allá del tiempo y de las palabras. Aunque ya no esté físicamente, su recuerdo, sus valores y su ejemplo siguen acompañándome y guiándome. Lo que dejó en mí no se perdió; vive en mi forma de pensar, de decidir y de seguir adelante.

Asimismo, dedico esta tesis a mi abuelita Carlota Pesantes Estrada y a mi abuelito Juan Tito Cotapo, quienes siguen siendo una fuente constante de apoyo, enseñanza y motivación. Su presencia, sus consejos y su cariño continúan impulsándome día a día, recordándome la importancia de avanzar con humildad, respeto y convicción.

Esta dedicatoria nace desde lo más personal de este camino. Es un reflejo del amor, la fe y el acompañamiento de quienes han estado conmigo no solo en esta etapa, sino a lo largo de toda mi vida.

**Jam Michele Sánchez Loaiza**

Dedico esta tesis a mis padres y a mi familia, quienes han sido la base fundamental de mi crecimiento personal y profesional.

A mi madre, por ser la influencia más importante en mi formación. Por enseñarme a mantenerme activo, a no conformarme, a buscar siempre aprender y avanzar. Por creer en mis ideas incluso cuando apenas comenzaban a tomar forma, por impulsarme a desarrollarlas y por acompañarme en cada etapa con confianza y apoyo constante. Gran parte de mi carácter y de mi manera de enfrentar los desafíos nace de su ejemplo.

A mi padre, por compartir conmigo el conocimiento técnico que dio inicio a mi camino en la refrigeración y la mecánica, y por enseñarme el valor del trabajo responsable y bien ejecutado.

Este logro representa una etapa más dentro de un proceso de crecimiento continuo que comenzó en casa y que hoy se proyecta hacia nuevos retos.

**Luis Santiago Arana Ramos**

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme en cada etapa de este camino y darme la fortaleza necesaria para mantenerme firme cuando el proceso se volvió exigente. La fe fue el eje que sostuvo mis decisiones y me permitió avanzar con claridad, incluso en los momentos de mayor presión. En la constancia, en la disciplina y en la voluntad de no retroceder, siempre estuvo presente Su guía.

A mi familia, por el respaldo constante y por el esfuerzo que muchas veces no se ve, pero que sostiene todo. Gracias por creer en mí, por exigir carácter y por enseñarme que las cosas que realmente valen la pena no se construyen desde la comodidad, sino desde la responsabilidad, la constancia y el compromiso. Este logro nace de esos valores aprendidos en casa y fortalecidos con el tiempo.

De manera especial, a mis abuelitos, quienes con su ejemplo dejaron una huella profunda en mi forma de pensar y de actuar. De ellos aprendí el valor del trabajo honesto, la disciplina diaria y la firmeza ante las dificultades. Su manera de enfrentar la vida, sin excusas y con dignidad, fue una lección constante que hoy se refleja en cada paso dado. Su legado no está solo en los recuerdos, sino en la forma en que afronto los retos y asumo mis responsabilidades.

**Jam Michele Sánchez Loiza**

Agradezco profundamente a mi familia por su apoyo incondicional durante mi formación académica y el desarrollo de esta tesis.

A mi madre, por ser el impulso constante detrás de mi evolución. Por motivarme siempre a ampliar mis conocimientos, a asumir responsabilidades con madurez y a confiar en mi capacidad para crecer y liderar nuevos proyectos. Su influencia ha sido determinante en cada paso que he dado.

A mi padre, por aportar la base técnica que me permitió desarrollar una trayectoria que hoy integra distintas áreas de la ingeniería aplicada, desde el diseño y análisis hasta la optimización y automatización de sistemas.

A mi esposa, por acompañarme con amor y comprensión durante este proceso, por estar presente en cada etapa y por brindarme apoyo y tranquilidad mientras avanzaba en este objetivo.

A mi hijo, por ser mi motivación diaria y recordarme que cada esfuerzo tiene un propósito mayor, y que el crecimiento personal también es una forma de dar ejemplo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que aportaron a mi formación académica y profesional, contribuyendo a que esta tesis no sea solo un requisito universitario, sino una consolidación de años de aprendizaje, experiencia y desarrollo continuo.

**Luis Santiago Arana Ramos**

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño, construcción y validación experimental de un sistema de enfriamiento de agua para aplicaciones de terapia de inmersión deportiva. Este sistema se basa en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizando refrigerante R-410A, integrando tecnologías de monitoreo remoto vía IoT para garantizar la estabilidad térmica y la seguridad del usuario en rangos de 5°C a 15°C.

Para la implementación de este prototipo, se realizó un dimensionamiento térmico que determinó una capacidad frigorífica de 0.9 HP, soportado por un chasis de acero inoxidable AISI 316 validado mediante análisis de elementos finitos (FEA). La construcción es fabricada en acero estructural mediante procesos convencionales de corte y doblado mecánico, empleando herramientas manuales e industriales básicas. El ensamblaje del chasis se efectuó mediante uniones atornilladas perno, tuerca y arandela para facilitar ajustes y mantenimiento, complementado con soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) para la fijación estructural permanente en puntos críticos y el aislamiento elastomérico, logrando un circuito frigorífico con un nivel de vacío certificado de 300 micrones. A continuación, se desarrolló una arquitectura de control híbrida que separa la etapa de potencia de la maniobra, integrando una cadena de seguridad con presostatos y sensores de flujo que protegen los componentes críticos ante fallas operativas.

Por último, se validó el desempeño del sistema mediante pruebas de abatimiento (pull-down) y perturbación de carga. Los resultados demostraron que el equipo es capaz de reducir la temperatura de 150 litros de agua desde 24.5°C hasta 5°C en un tiempo de 80 minutos, entregando una potencia frigorífica real de 2.55 kW. La integración con la plataforma IoT permitió la visualización en tiempo real de las variables del proceso, confirmando la viabilidad técnica y operativa del prototipo para entornos de recuperación muscular.

**Palabras claves:** Chiller, Crioterapia, R-410A, Análisis FEA, Automatización, IoT, Eficiencia Energética.

## ABSTRACT

The objective of this project is the design, construction, and experimental validation of a water cooling system for sports immersion therapy applications. This system is based on a vapor compression refrigeration cycle using R-410A refrigerant, integrating remote monitoring technologies via IoT to ensure thermal stability and user safety within a range of 5°C to 15°C.

For the implementation of the prototype, a thermal sizing process was carried out, determining a nominal cooling capacity of 0.9 HP. The structure was fabricated from structural steel through conventional cutting and mechanical bending processes, using both manual and basic industrial tools. The chassis assembly was performed using bolted joints (bolt, nut, and washer) to facilitate adjustments and maintenance, complemented by Shielded Metal Arc Welding (SMAW) in critical structural points. Since this is an experimental prototype and not a clinical- or food-grade system, mechanical functionality and structural robustness were prioritized over specialized sanitary finishes. The system incorporated elastomeric insulation in the refrigeration lines, achieving an approximate vacuum level of 300 microns in the circuit prior to refrigerant charging..

Finally, the system performance was validated through pull-down and load perturbation tests. Results showed that the equipment is capable of reducing the temperature of 150 liters of water from 24.5°C to 5°C in 80 minutes, delivering a real cooling capacity of 2.55 kW. The integration with the IoT platform allowed for real-time visualization of process variables, confirming the technical and operational viability of the prototype for muscle recovery environments.

**Keywords:** Chiller, Cryotherapy, R-410A, FEA Analysis, Automation, IoT, Energy Efficiency.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>Problema</b>	2
<b>III.</b>	<b>Justificación</b>	3
<b>IV.</b>	<b>Objetivos</b>	4
	IV-A. Objetivo general . . . . .	4
	IV-B. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>V.</b>	<b>Marco Teórico</b>	5
	V-A. Principios Fisiológicos de la Crioterapia por Inmersión (CWI) . . . . .	5
	V-B. Fundamentos Termodinámicos del Ciclo de Refrigeración . . . . .	5
	V-C. Análisis de la Carga Térmica Metabólica (Carga Viva) . . . . .	7
	V-D. Análisis de Alternativas Comerciales en el Mercado . . . . .	8
	V-E. Propiedades del Refrigerante R-410A y Aceites POE . . . . .	11
	V-F. Aceros al Carbono y Protección Anticorrosiva . . . . .	12
	V-G. Teoría de Control On-Off con Histéresis . . . . .	12
	V-H. Internet de las Cosas (IoT) y Telemetría . . . . .	13
	V-I. Seguridad en Equipos Electromecánicos (IEC 60204-1) . . . . .	13
<b>VI.</b>	<b>Marco Metodológico</b>	15
	VI-A. Diagramas de la lógica operativa . . . . .	15
	VI-B. Caracterización de Componentes Mecánicos, Electrónicos y de Supervisión . . . . .	18
	VI-C. Especificaciones Técnicas, Materiales y Análisis de Integridad del Chasis . . . . .	21
	VI-D. Ajustes de Ingeniería y Definición Final de la Lógica de Control . . . . .	24
	VI-D1. Análisis de Elementos Finitos . . . . .	25
	VI-E. Implementación del Sistema de Filtrado de Sedimentos . . . . .	28
	VI-F. Montaje del circuito frigorífico y secuencia de interconexión . . . . .	28
	VI-G. Protocolo de Integridad Hidráulica y Uso de Glicol . . . . .	29
	VI-H. Diagrama Termodinámico y de Proceso . . . . .	29
	VI-I. Implementación del acumulador de succión y protección del compresor . . . . .	30
	VI-J. Integración hidráulica y criterios de homogeneidad térmica . . . . .	31
	VI-K. Arquitectura Eléctrica y Diagramas de Conexión . . . . .	31
	VI-L. Protocolos de Puesta en Marcha, Instrumentación y Verificación de Variables . . . . .	35
	VI-M. Pruebas de Integridad Estructural, Monitoreo de Datos y Estabilidad Térmica . . . . .	37
	VI-N. Estándares de montaje electromecánico y compatibilidad electromagnética . . . . .	39
	VI-Ñ. Selección de Accesorios y Adaptadores para la Interconexión Hidráulica . . . . .	39
	VI-Ñ1. Estrategia de Montaje y Flujo . . . . .	40
	VI-O. Montaje e Integración del Sistema de Filtrado Hidráulico . . . . .	41
	VI-P. Aislamiento Térmico del Tanque Reservorio (Robotex) . . . . .	41
	VI-Q. Integración Final del Sistema Prototipo . . . . .	42

<b>VII. Resultados</b>	43
VII-A. Análisis y Discusión de Resultados . . . . .	43
VII-B. Resultados de la Validación Mecánica (FEA) . . . . .	43
VII-C. Protocolos Operativos y Especificaciones Técnicas Finales . . . . .	44
VII-D. Telemetría y Calibración Digital (Smart Life) . . . . .	45
VII-E. Resultados de Hermeticidad y Deshidratación . . . . .	45
VII-F. Validación de Telemetría y Control IoT . . . . .	46
VII-G. Resultados de Desempeño Térmico y Estabilidad . . . . .	46
VII-G1. Rendimiento del Circuito Hidráulico . . . . .	47
VII-G2. Inmersión y Respuesta Fisiológica . . . . .	48
<b>VIII. Cronograma</b>	52
<b>IX. Presupuesto</b>	53
<b>X. Conclusiones</b>	54
<b>XI. Recomendaciones</b>	56
<b>Referencias</b>	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Diagrama de Flujo - Funcionamiento del Chiller . . . . .	15
2.	Diagrama de Flujo - Configuración mediante el PLC . . . . .	17
3.	Tina de Inmersión de PVC reforzado [Fuente: Los Autores]. . . . .	18
4.	Ventilador y unidad condensadora MAER [Fuente : Los Autores]. . . . .	19
5.	Bomba de circulación del sistema [30]. . . . .	20
6.	Controlador de Temperatura MOES [Fuente: Los Autores]. . . . .	21
7.	Chiller ensamblado [Fuente: Los Autores]. . . . .	23
8.	Distribución de tensiones de Von Mises en la carcasa del chiller [Fuente: Los Autores]. . . . .	26
9.	Desplazamientos resultantes bajo carga [Fuente: Los Autores]. . . . .	27
10.	Relación entre el porcentaje de Glicol y el punto de congelación del agua [Fuente: Los Autores]. . . . .	29
11.	Diagrama de flujo del ciclo frigorífico e interacción hidráulica [Fuente: Los Autores]. . . . .	30
12.	Layout de distribución interna del tablero de control [Fuente: Los Autores]. . . . .	32
13.	Diagrama del circuito de potencia [Fuente: Los Autores]. . . . .	33
14.	Diagrama de escalera (Lógica de Control) [Fuente: Los Autores]. . . . .	34
15.	Diagrama de conexiones del controlador de temperatura [Fuente: Los Autores]. . . . .	35
16.	Certificación de vacío profundo (300 micrones) en el display del Elitech MS-4000 [Fuente: Los Autores]. . . . .	38
17.	Nivelación y fijación del filtro al chasis [Fuente: Los Autores]. . . . .	42
18.	Mapa de tensiones de Von Mises mostrando zonas de bajo estrés mecánico [Fuente: Los Autores]. . . . .	43
19.	Nomenclatura de los Chiller [Fuente: Los Autores]. . . . .	44
20.	Monitoreo de la temperatura dérmica del usuario durante la sesión [Fuente: Los Autores]	48

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Comparativa técnica y económica entre alternativas del mercado y el prototipo . . . . .	10
II.	Propiedades Mecánicas del Acero al Carbono ASTM A36 [Fuente: Los Autores] . . . . .	25
III.	Lista de Materiales y Accesorios de Interconexión Hidráulica [Fuente: Los Autores] . . . . .	40
IV.	Registro de temperatura vs. Tiempo (Pull-Down - Condición de Noche)[Fuente: Los Autores] . . . . .	46
V.	Registro de temperatura vs. Tiempo (Pull-Down - Condición de Día) [Fuente: Los Autores]	47
VI.	Prueba de Recuperación Térmica (Perturbación) [Fuente: Los Autores] . . . . .	49
VII.	Cronograma de Mantenimiento Preventivo Mensual [Fuente: Los Autores] . . . . .	50
VIII.	Cronograma del Proyecto . . . . .	52
IX.	Presupuesto para la implementación del trabajo de titulación . . . . .	53

## I. INTRODUCCIÓN

La recuperación muscular es un componente crítico en el rendimiento deportivo de alto nivel. En la actualidad, la terapia de inmersión en agua fría (CWI, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como uno de los métodos más eficaces para reducir la inflamación y acelerar la recuperación post-entrenamiento. Sin embargo, la implementación de esta terapia en Ecuador enfrenta una barrera tecnológica y económica significativa: los equipos comerciales disponibles son importados, de alto costo y carecen de soporte técnico local. Por otro lado, la solución tradicional basada en el uso de hielo resulta insostenible operativamente debido a la imposibilidad de mantener una temperatura constante durante sesiones prolongadas sin afectar los resultados de forma negativa para la persona que se somete a la terapia.

El presente trabajo de titulación propone el desarrollo de un prototipo de chiller (enfriador de líquido) diseñado específicamente para este propósito, integrando ingeniería mecánica, control electrónico y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés). La innovación principal del proyecto radica en la implementación de un sistema de control lógico programable que no solo regula la temperatura del agua con precisión entre 5°C y 15°C, sino que permite la supervisión remota de variables críticas como la presión del refrigerante y el estado de los actuadores mediante una aplicación móvil.

A diferencia de los sistemas de aire acondicionado adaptados artesanalmente, este prototipo ha sido diseñado bajo criterios de ingeniería termodinámica, utilizando refrigerante R-410A y un intercambiador de calor optimizado de cobre y PVC. El documento detalla todo el ciclo de vida del proyecto: desde el dimensionamiento térmico y el análisis estructural por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés), hasta la construcción física, el proceso de certificación de hermeticidad y la validación experimental de su eficiencia energética.

## II. PROBLEMA

La crioterapia mediante inmersión en agua fría se ha consolidado como una práctica recurrente para favorecer la recuperación muscular después de actividades físicas intensas. Este tratamiento consiste en sumergir el cuerpo en agua fría entre 8 y 15 °C con el fin de reducir la inflamación y el dolor muscular, favoreciendo la regeneración de tejidos [1]. Sin embargo, en la práctica cotidiana, la preparación de la tina suele realizarse añadiendo hielo de forma manual, lo que dificulta mantener una temperatura constante durante toda la sesión. Estudios recientes señalan que esta variabilidad térmica disminuye la uniformidad del estímulo, lo que afecta la respuesta fisiológica y reduce la eficacia terapéutica. Esta inestabilidad representa un problema directo para la seguridad y la reproducibilidad del tratamiento [2].

Si bien se han desarrollado dispositivos para controlar temperaturas en agua con fines terapéuticos, la adaptación a usos de inmersión corporal requiere considerar factores como compatibilidad con la piel, resistencia a la corrosión y mantenimiento sanitario. La selección de materiales, el diseño de los componentes en contacto con el agua y la circulación hidráulica deben asegurar estabilidad térmica sin comprometer la seguridad del usuario [3]. Además, el uso de refrigerantes de bajo impacto ambiental introduce restricciones adicionales que influyen en el desempeño y la disponibilidad de equipos apropiados para entornos clínicos y deportivos. Este conjunto de exigencias incrementa el costo y la complejidad de implementación [4].

En el ámbito industrial existen enfriadoras tipo chiller capaces de mantener rangos térmicos precisos y operar de manera prolongada. Sin embargo, su uso directo en aplicaciones terapéuticas no es habitual debido a que fueron diseñadas para procesos productivos, no para contacto humano prolongado ni para protocolos de higiene o desinfección frecuentes. A esto se suma que la automatización con monitoreo remoto, aunque común en instalaciones industriales, no se traslada de manera generalizada a los equipos de inmersión [5]. La mayoría de las unidades disponibles opera mediante ajustes locales, lo que introduce variabilidad entre sesiones y limita la trazabilidad. Aunque existen desarrollos experimentales con PLC para operar válvulas y bombas a distancia, estas soluciones aún no se han transferido de forma consistente al campo de la inmersión terapéutica [6].

Finalmente, la validación de prototipos destinados a inmersión en frío requiere ensayos experimentales rigurosos en condiciones de uso real. Entre los parámetros críticos se encuentran la estabilidad térmica, el tiempo necesario para alcanzar la temperatura objetivo y el comportamiento bajo ciclos prolongados y variaciones de carga térmica [7]. Sin embargo, muchos desarrollos no incluyen rutinas de prueba estandarizadas ni documentación continua, lo que limita la evidencia disponible para respaldar su aplicación profesional. Esta falta de datos consistentes complica la aceptación y estandarización de nuevas soluciones tecnológicas en recuperación muscular [8].

### III. JUSTIFICACIÓN

El empleo de un prototipo de refrigeración tipo chiller destinado a tinas de inmersión ofrece una alternativa técnica para dotar a la crioterapia por inmersión de condiciones térmicas controladas y reproducibles. Un equipo específicamente diseñado para este fin puede asegurar una entrega de frío más homogénea que el aporte manual de hielo y reducir la variabilidad entre sesiones, lo que contribuye a resultados más consistentes en la recuperación muscular. Asimismo, la integración de un controlador lógico programable con acceso remoto habilita el registro continuo de datos, la trazabilidad de uso y la supervisión a distancia, facilitando la implementación de protocolos sistemáticos en entornos deportivos y clínicos [9]. Esta capacidad de documentación también fortalece la evidencia aplicada y la comparación entre distintas configuraciones terapéuticas [10].

Para resolver ese problema operativo y elevar la calidad del procedimiento, se plantea incorporar un prototipo de refrigeración tipo chiller dedicado a tinas de inmersión, diseñado para alcanzar la temperatura deseada con rapidez y mantenerla con variaciones mínimas en el volumen de agua [11]. Esto exige una combinación coherente de transferencia de calor (intercambiadores de superficie y áreas de contacto), circulación (bomba de recirculación y red de distribución para evitar zonas con temperaturas heterogéneas) y control del ciclo de compresión de vapor para equilibrar capacidad frigorífica, consumo eléctrico y vida útil de los componentes [12]. Además, es indispensable seleccionar refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) y compatibilidad adecuada con materiales y lubricantes, de modo que el equipo resulte eficiente y más respetuoso con el medio ambiente sin sacrificar rendimiento; recientes estudios ofrecen criterios comparativos de seguridad, eficiencia y viabilidad técnica que guían esas decisiones de diseño [13].

La incorporación de supervisión y control remotos mediante PLC conectado vía internet, responde a necesidades concretas de gestión, seguridad y continuidad operativa. El monitoreo continuo de variables como temperatura, caudal y consumo energético permite detectar desviaciones antes de que afecten la aplicación terapéutica [14]. Del mismo modo, arquitecturas de control distribuidas y protocolos de comunicación en tiempo real han demostrado latencias y rendimiento compatibles con aplicaciones de supervisión remota, lo que sugiere que la conectividad a distancia puede sostener funciones de control y registro sin sacrificar la respuesta operativa [15].

Para la presente tesis, la relevancia práctica se sustenta en la importancia de mantener temperaturas de inmersión controladas para reproducir efectos fisiológicos consistentes. Los estudios de revisión sobre inmersión en agua fría subrayan que la eficacia del tratamiento depende de lograr condiciones térmicas estables y protocolos repetibles [16]. A su vez, la limitada presencia de dispositivos comerciales que integran refrigeración activa y control remoto evidencian un vacío técnico y una oportunidad para desarrollar y validar un prototipo que combine estas funciones, lo que representa una contribución aplicada con potencial alcance en la práctica deportiva y clínica [17].

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Desarrollar un prototipo de chiller con control y supervisión remota mediante PLC e IOT para terapia de inmersión en frío.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Desarrollar un sistema de refrigeración tipo chiller que enfríe y mantenga estable la temperatura del agua utilizada en la tina de inmersión.
- Implementar un sistema de control automatizado para la operación del equipo de preenfriamiento de forma remota.
- Validar el desempeño del sistema mediante pruebas de enfriamiento, verificando los tiempos de respuesta, la precisión y la capacidad de conservación de temperatura dentro del rango operativo de 5-15 °C.

## V. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo establece los fundamentos científicos y tecnológicos que sustentan el diseño, construcción y control del prototipo de enfriamiento de agua. Se aborda la investigación desde una perspectiva multidisciplinaria, integrando principios de termodinámica aplicada, transferencia de calor, ciencia de materiales y teoría de control automático, necesarios para justificar las decisiones de ingeniería adoptadas en el desarrollo del chiller para crioterapia.

### V-A. Principios Fisiológicos de la Crioterapia por Inmersión (CWI)

La inmersión en agua fría (CWI, Cold Water Immersion por sus siglas en inglés) es una modalidad terapéutica ampliamente utilizada en la medicina deportiva para la recuperación post-ejercicio. Su principio de funcionamiento se basa en la transferencia térmica conductiva y convectiva entre el cuerpo humano y el fluido, la cual es significativamente más eficiente que la crioterapia por aire debido a la mayor capacidad calorífica ( $C_p \approx 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) y conductividad térmica del agua [18].

Desde el punto de vista fisiológico, la exposición a temperaturas entre  $5^\circ\text{C}$  y  $15^\circ\text{C}$  induce una vasoconstricción periférica inmediata, reduciendo el flujo sanguíneo hacia los tejidos musculares dañados. Este mecanismo disminuye la permeabilidad vascular, limitando la extravasación de fluidos y, consecuentemente, reduciendo el edema y la respuesta inflamatoria aguda. Al finalizar la inmersión, el retorno a la temperatura ambiente provoca una vasodilatación reactiva que aumenta el flujo sanguíneo, facilitando la eliminación de metabolitos de desecho como el lactato y la creatina quinasa [Versey2020]. Para garantizar la efectividad y seguridad del tratamiento, es crítico que el sistema de refrigeración mantenga la temperatura del agua estable dentro de la ventana terapéutica, evitando fluctuaciones que puedan causar hipotermia o quemaduras por frío.

### V-B. Fundamentos Termodinámicos del Ciclo de Refrigeración

El funcionamiento del chiller desarrollado se fundamenta en el ciclo termodinámico de refrigeración por compresión de vapor, el cual es el método más extendido y eficiente para transferir calor desde un medio a baja temperatura hacia un sumidero de alta temperatura. A diferencia de un ciclo ideal, el ciclo real presenta irreversibilidades por fricción en las tuberías e ineficiencias electromecánicas, pero su análisis conceptual se divide en cuatro etapas principales regidas por cambios de entalpía ( $h$ ) y entropía ( $s$ ) [19].

**1. Compresión (Proceso Isentrópico teórico 1-2):** El refrigerante (R-410A) ingresa al compresor tipo scroll en estado de vapor saturado a baja presión y baja temperatura. Durante la compresión, se aporta trabajo mecánico al fluido ( $W_{in}$ ), elevando drásticamente su presión y temperatura hasta convertirlo en vapor sobrecalentado. En un ciclo ideal, este proceso es isentrópico ( $s_1 \approx s_2$ ), es

decir, no hay cambio en la entropía, y el trabajo del compresor se define por la diferencia de entalpías ( $W_{in} = h_2 - h_1$ ). Sin embargo, en la práctica, la entropía aumenta ligeramente debido a las irreversibilidades mecánicas del scroll [19].

**2. Condensación (Proceso Isobárico 2-3):** El vapor sobrecalentado a alta presión ingresa al serpentín del condensador. Aquí, el fluido cede calor ( $Q_{out}$ ) al ambiente gracias al flujo de aire forzado por el ventilador. Termodinámicamente, este es un proceso de rechazo de calor a presión constante. El refrigerante experimenta una disminución en su entalpía y entropía mientras cambia de fase, pasando de vapor sobrecalentado a vapor saturado, y finalmente a líquido subenfriado al salir del condensador ( $Q_{out} = h_2 - h_3$ ) [19].

**3. Expansión (Proceso Isoentálpico 3-4):** El líquido refrigerante a alta presión atraviesa el dispositivo de expansión (tubo capilar o válvula). Este estrangulamiento provoca una caída abrupta de presión y temperatura sin transferencia de calor ni trabajo externo, por lo que la entalpía se mantiene constante ( $h_3 \approx h_4$ ). Durante esta expansión flash, una pequeña fracción del líquido se evapora instantáneamente, por lo que el refrigerante entra al evaporador como una mezcla líquido-vapor con un aumento en su entropía [19].

**4. Evaporación (Proceso Isobárico 4-1):** La mezcla bifásica a baja presión y baja temperatura ingresa al intercambiador de calor (evaporador). En esta etapa ocurre el efecto frigorífico útil: el refrigerante absorbe el calor latente ( $Q_{in}$ ) del agua de la tina, reduciendo la temperatura del agua hacia la ventana de 515. Al absorber este calor, el fluido se evapora por completo, aumentando significativamente su entalpía y entropía ( $Q_{in} = h_1 - h_4$ ), hasta salir nuevamente como vapor saturado listo para reiniciar el ciclo en el compresor [19].

#### *Bases Fisiológicas de la Inmersión en Agua Fría (CWI)*

Para que el diseño mecatrónico del chiller tenga validez en el campo de la terapia deportiva, es imperativo comprender los mecanismos fisiológicos que justifican el enfriamiento del agua. La inmersión en agua fría (Cold Water Immersion - CWI) dentro de una ventana de 515 desencadena una serie de respuestas termorreguladoras, hemodinámicas y neuromusculares en el cuerpo humano, diseñadas para preservar la homeostasis térmica y facilitar la recuperación muscular post-ejercicio [20].

El mecanismo principal de la CWI es la **vasoconstricción periférica**. Cuando la piel entra en contacto con el agua a baja temperatura, los termorreceptores cutáneos envían señales al hipotálamo, el cual activa el sistema nervioso simpático. Esto provoca la contracción del músculo liso en las paredes de las arteriolas periféricas, reduciendo drásticamente el flujo sanguíneo hacia las extremidades sumergidas. Esta restricción hemodinámica es crucial terapéuticamente, ya que limita la perfusión de

fluidos hacia los espacios intersticiales, reduciendo la formación de edemas y mitigando la migración de células inflamatorias (como leucocitos) hacia las microlesiones musculares generadas durante el entrenamiento [21].

Simultáneamente, el descenso de la temperatura tisular genera una **reducción del metabolismo local**. La ley de Van 't Hoff y el coeficiente de temperatura ( $Q_{10}$ ) establecen que la tasa de las reacciones bioquímicas disminuye a medida que baja la temperatura. Al enfriar el músculo, se reduce su demanda de oxígeno y ATP, lo que retrasa el daño secundario por hipoxia en las células circundantes a las fibras lesionadas. Adicionalmente, el frío disminuye la velocidad de conducción nerviosa, lo que eleva el umbral del dolor y proporciona un efecto analgésico temporal muy valorado en la fisioterapia [20].

Finalmente, el estímulo térmico se complementa con la **presión hidrostática** ejercida por el volumen de 208L de agua sobre el cuerpo. Esta presión física actúa como un vendaje compresivo natural que favorece el retorno venoso y linfático. Una vez que el usuario abandona la tina y su cuerpo experimenta una vasodilatación de rebote (recalentamiento), este aumento del flujo sanguíneo central facilita el "barrido" eliminación de subproductos metabólicos, como el lactato y la creatina quinasa, acelerando la recuperación de la capacidad de contracción muscular para la siguiente sesión deportiva [21].

#### *V-C. Análisis de la Carga Térmica Metabólica (Carga Viva)*

El dimensionamiento de un sistema de refrigeración para inmersión humana difiere significativamente de la refrigeración de procesos industriales o comerciales estáticos, debido a la presencia de una carga térmica viva y altamente dinámica: el cuerpo humano. Al sumergir a un usuario en agua a temperaturas entre 515, se establece un gradiente térmico severo ( $\Delta T \approx 22$  a  $32^\circ\text{C}$ ) respecto a la temperatura corporal basal ( $\approx 37^\circ\text{C}$ ), lo que desencadena una transferencia de calor masiva desde el usuario hacia el fluido termoconductor [22].

*Estimación del Calor Disipado por el Usuario:* Para calcular el impacto de esta carga en el chiller, es necesario cuantificar la tasa metabólica basal y la respuesta termogénica de defensa del cuerpo. Un adulto promedio en reposo (área de superficie corporal aproximada de  $1.8\text{m}^2$ ) *disipa alrededor de 100W a 120W* ( $\approx 340$  a  $410$  BTU/h) en condiciones ambientales normales de 22. Sin embargo, al ser sometido a un estrés térmico agudo por inmersión en agua fría (CWI), el sistema nervioso central activa mecanismos termogénicos compensatorios, como los escalofríos involuntarios (termogénesis tiritante) y el aumento del gasto cardíaco [23].

Estudios fisiológicos de transferencia de calor en inmersión han demostrado que, durante los primeros 510 minutos en agua a 10, la pérdida de calor por convección desde la piel hacia el agua puede disparar la disipación térmica neta del cuerpo hasta valores pico de 300W a 400W ( $\approx 1020$  a  $1360$  BTU/h), dependiendo de la composición corporal del atleta y la agitación del fluido [22, 23].

*Compensación por Capacidad Frigorífica:* Esta inyección abrupta de energía térmica ( $Q_{metabólico}$ ) dentro del volumen de 208L de agua representa un desafío crítico para la estabilidad del sistema. Si la capacidad frigorífica del chiller fuera igual o ligeramente superior a las pérdidas por conducción de las paredes de la tina, la introducción del usuario provocaría un aumento inmediato y sostenido en la temperatura del agua, rompiendo la ventana terapéutica deseada.

Es en este punto donde se justifica técnica y matemáticamente la selección de un compresor de 0.9 HP con una capacidad nominal de 9000BTU/h ( $\approx 2637$  W). Al contrastar la capacidad del equipo frente a la demanda metabólica máxima estimada:

$$Q_{reserva} = Q_{chiller} - (Q_{conducción} + Q_{bomba} + Q_{metabólico}) \quad (1)$$

Incluso asumiendo el escenario más crítico donde un atleta disipe 1360BTU/h ( $\approx 400$  W), y sumando las ganancias de calor parasíticas del entorno y el trabajo mecánico de la bomba de recirculación (estimadas conservadoramente en 1500BTU/h), la carga total del sistema ( $\approx 2860$  BTU/h) representa únicamente alrededor del 32 de la capacidad total instalada (9000BTU/h).

Esta holgura de diseño ( $Q_{reserva}$ ) es vital y cumple dos propósitos fundamentales. En primer lugar, asegura que el equipo pueda abatir rápidamente el calor inyectado por el usuario, manteniendo la temperatura del agua rígidamente anclada al setpoint programado mediante la histéresis del controlador MOES. En segundo lugar, previene que el compresor opere en ciclos de trabajo del 100 (funcionamiento continuo) durante sesiones sucesivas de múltiples atletas, extendiendo la vida útil de la unidad motocompresora y reduciendo la probabilidad de fallos por fatiga térmica en el embobinado [22].

#### V-D. Análisis de Alternativas Comerciales en el Mercado

El creciente interés en la terapia de inmersión en agua fría (CWI, por sus siglas en inglés) ha impulsado el desarrollo de diversas soluciones comerciales para satisfacer la demanda de atletas, clínicas de fisioterapia y usuarios domésticos. El análisis del estado del arte comercial permite identificar las brechas tecnológicas y económicas existentes, justificando así la necesidad y viabilidad del prototipo desarrollado en este trabajo de titulación.

Actualmente, los equipos disponibles en el mercado pueden categorizarse en tres grandes grupos: sistemas pasivos aislados, sistemas activos integrados de gama alta (Premium) y chillers genéricos adaptados. A continuación, se detalla el perfil técnico de cada categoría:

*Sistemas Pasivos Aislados (Ej. Ice Barrel):* Estos sistemas consisten en recipientes de alta durabilidad, generalmente fabricados mediante rotomoldeo con polietileno y aislamiento de espuma de poliuretano. Su principal ventaja radica en la simplicidad, portabilidad y nulo consumo eléctrico directo. Sin embargo, carecen de un sistema de refrigeración activo, obligando al usuario a depender de la compra y adición manual constante de hielo para alcanzar la ventana terapéutica. Esta dependencia genera una inestabilidad térmica severa a medida que el hielo se derrite, impidiendo mantener una temperatura constante durante sesiones prolongadas o uso continuo por múltiples usuarios. Además, el costo recurrente del hielo a mediano y largo plazo supera significativamente el gasto inicial del equipo.

*Sistemas Activos Integrados - Premium (Ej. The Cold Plunge):* Representan el estándar más alto del mercado comercial. Estos equipos integran una tina ergonómica (usualmente de acrílico o fibra de vidrio) con un sistema de enfriamiento de circuito cerrado, filtración de micrones y, en muchos casos, saneamiento por ozono o luz UV. Operan típicamente con compresores fraccionarios que oscilan entre 1/4 HP y 1/2 HP. Aunque ofrecen una experiencia de usuario excelente con conectividad a aplicaciones móviles para control remoto, su principal barrera es el costo de adquisición, el cual suele oscilar entre los \$4,000 y \$6,000 USD (sin incluir aranceles de importación), limitando su accesibilidad a gimnasios de élite o usuarios de alto poder adquisitivo.

*Chillers Genéricos Adaptados (Ej. Equipos de Acuariofonía o Hidroponía):* Una solución intermedia adoptada por muchos usuarios es la compra de chillers independientes diseñados originalmente para enfriar peceras o cultivos hidropónicos (marcas como Active Aqua o Vevor), adaptándolos a tinas convencionales. Estos equipos suelen poseer capacidades entre 1/3 HP y 1 HP. Si bien reducen el costo de inversión inicial (\$500 a \$1,200 USD), presentan deficiencias importantes: no están diseñados con las normativas de seguridad eléctrica para inmersión humana (riesgo de electrocución), sus termostatos suelen ser locales sin conectividad IoT, y su capacidad de enfriamiento suele verse mermada al no estar optimizados para lidiar con la carga metabólica humana y grandes volúmenes de agua sin aislamiento adecuado.

*Justificación del Prototipo Propuesto:* Frente a este panorama, el prototipo diseñado en este proyecto se posiciona como una solución de alto rendimiento y bajo costo. Al integrar un compresor de 0.9 HP (9000BTU/h), el equipo posee una capacidad frigorífica que supera holgadamente a la mayoría de las opciones comerciales de entrada y gama media, permitiendo un *pull-down* (enfriamiento inicial) mucho más rápido y una recuperación térmica inmediata ante la carga metabólica. Adicionalmente, la implementación del módulo inteligente MOES democratiza el acceso a la tecnología IoT, igualando

las capacidades de supervisión remota de los equipos Premium, pero con una fracción del costo de inversión.

Para ilustrar de forma cuantitativa las diferencias entre las opciones comerciales y la solución mecatrónica desarrollada, la Tabla I presenta una matriz comparativa basada en especificaciones técnicas promedio y costos estimados.

Tabla I: Comparativa técnica y económica entre alternativas del mercado y el prototipo

<b>Característica</b>	<b>Sistemas Pasivos (Ice Barrel)</b>	<b>Chillers Genéricos Adaptados</b>	<b>Sistemas Premium (Plunge)</b>	<b>Prototipo Desarrollado</b>
<b>Principio de Enfriamiento</b>	Adición manual de hielo	Compresión de vapor (R-134a / R-410A)	Compresión de vapor (R-410A / R-32)	Compresión de vapor (R-410A)
<b>Potencia Frigorífica</b>	N/A (Depende del hielo)	Media (Típ. 1/3 a 1/2 HP)	Media/Alta (1/4 a 1 HP)	Alta (0.9 HP / 9000BTU/h)
<b>Control y Conectividad</b>	Nulo	Termostato local digital	Termostato digital + App Móvil (Wi-Fi)	Controlador Inteligente MOES + App (IoT)
<b>Estabilidad Térmica</b>	Baja (fluctuación constante)	Media (Depende de adaptación)	Alta (precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ )	Alta (Histéresis controlada de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ )
<b>Seguridad Eléctrica para Inmersión</b>	N/A	Riesgo latente (uso no previsto)	Alta (Certificaciones UL/CE, GFCI)	Alta (Separación de circuitos, Tierra equipotencial)
<b>Costo de Inversión Estimado (USD)</b>	\$1,000 - \$1,200	\$500 - \$1,200 (+ Tina)	\$4,000 - \$6,000+	\$400 - \$700 (Costo de fabricación)
<b>Costo Operativo a Largo Plazo</b>	Muy Alto (Compra de hielo)	Bajo (Electricidad)	Medio (Electricidad y filtros)	Bajo (Electricidad)

El análisis de esta tabla reafirma que el enfoque mecatrónico adoptado en esta investigación logra un punto de equilibrio óptimo. Se evita la dependencia económica y la inestabilidad de los sistemas pasivos, se superan los riesgos y limitaciones de control de los chillers genéricos, y se igualan las prestaciones de automatización de los sistemas de lujo, validando así la factibilidad y el impacto positivo de la propuesta de ingeniería.

El prototipo opera bajo el ciclo termodinámico de compresión de vapor, el cual se fundamenta en la capacidad de un fluido refrigerante para absorber calor latente a baja presión y rechazarlo a alta presión. Este ciclo consta de cuatro procesos principales representados teóricamente en el diagrama Presión-Entalpía (P-h):

1. **Compresión Isentrópica (1-2):** El refrigerante en estado de vapor saturado o sobrecalentado es comprimido, elevando su presión y temperatura hasta superar la temperatura del ambiente circundante.
2. **Rechazo de Calor Isobárico (2-3):** El gas caliente atraviesa el condensador, donde cede calor al aire ambiente, condensándose hasta convertirse en líquido saturado o subenfriado.
3. **Absorción de Calor Isobárica (4-1):** El refrigerante a baja temperatura ingresa al evaporador, donde absorbe el calor del agua de proceso, evaporándose completamente antes de retornar al compresor [Cengel2021].

#### *V-E. Propiedades del Refrigerante R-410A y Aceites POE*

El R-410A es una mezcla zeotrópica compuesta por 50 % de R-32 y 50 % de R-125 en masa. A diferencia de otros refrigerantes, el R-410A se comporta como una mezcla casi azeotrópica, presentando un deslizamiento de temperatura (glide) despreciable (0.1 K) durante el cambio de fase. Esta característica permite que el refrigerante se comporte como una sustancia pura en los intercambiadores de calor, manteniendo una temperatura constante a presión constante, lo cual es ideal para el control preciso de la temperatura del agua [24].

Sin embargo, el R-410A opera a presiones significativamente más altas (aprox. 60 % mayores) que sus predecesores como el R-22. Esto impone requisitos estructurales estrictos en las tuberías y componentes, exigiendo espesores de pared mayores y soldaduras de alta integridad. Además, el R-410A requiere el uso de aceites sintéticos de Polioliéster (POE) para la lubricación del compresor. Los aceites POE son altamente higroscópicos, es decir, tienen una gran afinidad por absorber humedad del ambiente. La presencia de humedad en un sistema con POE puede provocar hidrólisis, generando ácidos que corroen los bobinados del motor y cobrean los componentes mecánicos. Por esta razón, el marco teórico enfatiza la necesidad crítica de procesos de vacío profundo y el uso de filtros deshidratadores en la línea líquida [25].

La eficiencia del sistema depende de la transferencia de calor en el evaporador. Para aplicaciones con agua que puede contener impurezas biológicas (piel, cabello, sedimentos), los intercambiadores de placas compactos presentan un alto riesgo de incrustación (fouling). Por ello, la teoría respalda el uso de intercambiadores de tipo Carcasa y Tubo (Shell and Tube).

El diseño seleccionado utiliza una configuración de flujo en contracorriente, donde el refrigerante y el agua fluyen en direcciones opuestas. Según la teoría de transferencia de calor, esta disposición

maximiza la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD), permitiendo una transferencia de energía más eficiente que el flujo paralelo. La ecuación general que rige este proceso es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (2)$$

Donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor,  $A$  es el área superficial de contacto (determinada por la longitud y diámetro de la tubería de cobre) y  $\Delta T_{lm}$  es la diferencia de temperatura media logarítmica. El uso de cobre para el serpentín interno se justifica por su alta conductividad térmica ( $k \approx 385 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), mientras que la carcasa de PVC actúa como una barrera adiabática gracias a su baja conductividad ( $k \approx 0,19 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), minimizando las pérdidas parásitas hacia el ambiente [26].

#### *V-F. Aceros al Carbono y Protección Anticorrosiva*

El bastidor del equipo debe soportar cargas estáticas (peso de componentes) y dinámicas (vibraciones del compresor). El Acero al Carbono ASTM A36 es el material estándar para estas aplicaciones debido a su alto módulo de elasticidad ( $E \approx 200 \text{ GPa}$ ) y límite de fluencia ( $\sigma_y \approx 250 \text{ MPa}$ ). Sin embargo, desde el punto de vista electroquímico, el hierro presente en el acero es termodinámicamente inestable en presencia de oxígeno y humedad, tendiendo a retornar a su estado de óxido (herrumbre).

Para garantizar la durabilidad del chasis en un ambiente de operación húmedo, la teoría de protección de materiales dicta la necesidad de aislar el sustrato metálico del electrolito (humedad ambiental). Esto se logra mediante sistemas de recubrimiento de barrera. Las pinturas epóxicas actúan mediante una alta densidad de reticulación que impide la difusión de agua y oxígeno, mientras que los acabados de poliuretano proporcionan resistencia a la degradación por radiación ultravioleta (UV) y abrasión mecánica. La correcta aplicación de estos esquemas es vital para prevenir la corrosión por picaduras que podría comprometer la integridad estructural [27].

#### *V-G. Teoría de Control On-Off con Histéresis*

Para la regulación de temperatura en sistemas de refrigeración de inercia térmica media, el control más robusto y utilizado es el de dos posiciones (On-Off) con banda muerta o histéresis. A diferencia del control proporcional, que variaría la velocidad del compresor (requiriendo tecnología Inverter costosa), el control On-Off mantiene el compresor encendido hasta alcanzar el límite inferior del setpoint y apagado hasta superar el límite superior.

La histéresis ( $\Delta T$ ) es fundamental para proteger el equipo electromecánico. Sin ella, el ruido en la señal del sensor o pequeñas fluctuaciones térmicas provocarían conmutaciones rápidas y sucesivas (ciclaje corto) del contactor y del motor del compresor. El ciclaje corto es una de las principales

causas de falla prematura en motores de inducción debido a las altas corrientes de arranque (LRA) que generan calentamiento excesivo en los bobinados. Matemáticamente, la lógica se define como:

$$u(t) = \begin{cases} OFF & \text{si } T(t) \leq T_{set} - \Delta T/2 \\ ON & \text{si } T(t) \geq T_{set} + \Delta T/2 \end{cases} \quad (3)$$

Esta lógica asegura que el compresor opere durante periodos mínimos suficientes para garantizar el retorno de aceite y la disipación de calor del motor [28].

#### V-H. Internet de las Cosas (IoT) y Telemetría

El paradigma de IoT (Internet of Things) implica la interconexión de dispositivos físicos a través de internet para el intercambio de datos. En el contexto de este proyecto, se aplica una arquitectura de tres capas:

1. **Capa de Percepción:** Sensores y actuadores locales que capturan el estado físico del sistema.
2. **Capa de Red:** Módulos de comunicación (ej. Wi-Fi) que encapsulan los datos bajo protocolos ligeros como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), optimizados para bajo ancho de banda y latencia.
3. **Capa de Aplicación:** Plataformas en la nube (como Tuya Smart) que procesan los datos y los presentan en interfaces gráficas (Dashboards) para el usuario final.

Esta tecnología permite la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, al permitir al usuario o técnico monitorear tendencias de temperatura o alertas operativas antes de que ocurra una falla catastrófica [11].

#### V-I. Seguridad en Equipos Electromecánicos (IEC 60204-1)

El diseño de equipos que combinan electricidad y agua exige el cumplimiento estricto de normas de seguridad. La norma IEC 60204-1 "Seguridad de las máquinas, estableciendo los requisitos fundamentales adoptados en este marco teórico:

- **Separación de Circuitos:** La exigencia de aislar galvánicamente el circuito de control (baja tensión, 24 VDC) del circuito de potencia (alta tensión, 220 VAC) para proteger al operador.

- **Protección contra Sobrecorrientes:** El uso obligatorio de dispositivos de protección térmica y magnética para evitar incendios por cortocircuitos o sobrecargas.
- **Puesta a Tierra:** La conexión equipotencial de todas las masas metálicas accesibles a un conductor de protección (PE) es la medida primaria contra choques eléctricos por contacto indirecto. En caso de falla de aislamiento, la corriente se deriva a tierra, disparando las protecciones antes de que pueda circular por el cuerpo humano [29].

## VI. MARCO METODOLÓGICO

### VI-A. Diagramas de la lógica operativa

Como paso preliminar a la implementación física, se definió la arquitectura lógica del sistema para garantizar una operación segura y eficiente. A continuación se muestran los diagramas que ilustran el funcionamiento y la arquitectura del chiller, cada uno enfocado en una sección específica del sistema. El diseño de estos flujos implementa una arquitectura de estados finitos donde el sistema evalúa constantemente las condiciones de seguridad antes de transitar a una etapa de operación activa.

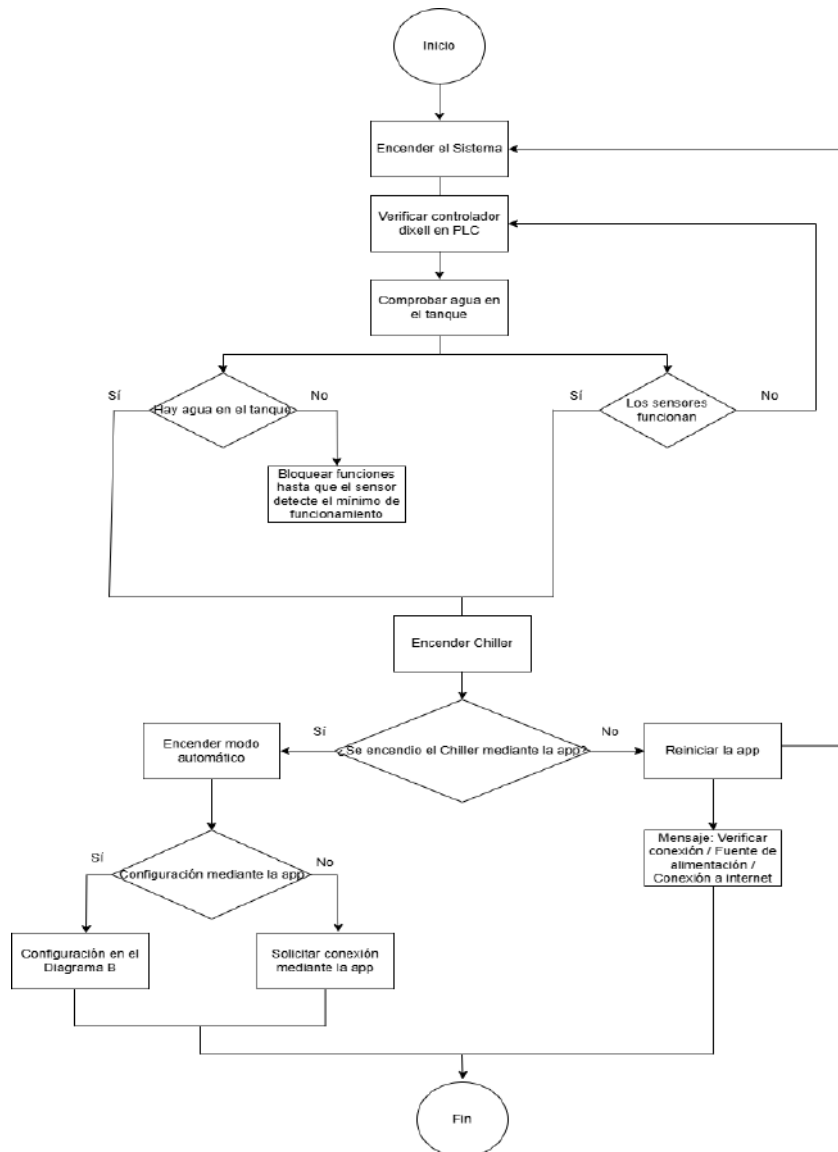


Figura 1: Diagrama de Flujo - Funcionamiento del Chiller [Fuente: Los Autores].

En la Fig. 1 anteriormente mostrada se observa el flujo operativo durante los ciclos de inmersión, desde la verificación de la bomba de recirculación y del compresor hasta la finalización del enfriamiento. Incluye la selección y el monitoreo del tiempo de inmersión mediante cronómetro y la lógica para ajustar o limitar tiempos cuando se exceden umbrales seguros. Contempla rutas de mitigación y apagado automático ante fallos de sensores o condiciones anómalas, estableciendo un protocolo de seguridad pasiva que prioriza la protección del usuario frente a cualquier inconsistencia operativa. Adicionalmente, se integró una lógica de histéresis térmica para evitar el encendido y apagado frecuente del compresor, lo cual podría reducir significativamente la vida útil del equipo electromecánico [28].

El diagrama muestra el proceso de puesta en marcha y operación del chiller, comenzando con el encendido del sistema y la verificación del controlador y de los sensores de nivel de agua. Si el tanque no posee el nivel suficiente o algún sensor presenta falla, el sistema bloquea las funciones mediante un enclavamiento lógico hasta asegurar condiciones seguras. Una vez validado el estado de operación, se procede al encendido del chiller, el cual puede activarse de manera remota mediante la aplicación, permitiendo una flexibilidad operativa adaptada al entorno del gimnasio o domicilio.

Para cumplir con el requerimiento de supervisión remota, se diseñó la lógica de comunicación entre el control local y la interfaz de usuario. Configuración y control vía app: presenta la secuencia de arranque y verificación del controlador, nivel de agua y estado de sensores antes de habilitar el chiller. Determina si el encendido proviene de la aplicación para activar el modo automático, caso contrario solicita reconexión de la app. Incluye mensajes y rutas de recuperación ante pérdida de comunicación, fallo de alimentación o sensores, garantizando que el chiller opere sólo con condiciones y conectividad confiables. Esta arquitectura cliente-servidor asegura que, incluso ante una caída de la red Wi-Fi, el controlador local mantenga la última configuración segura conocida [11].

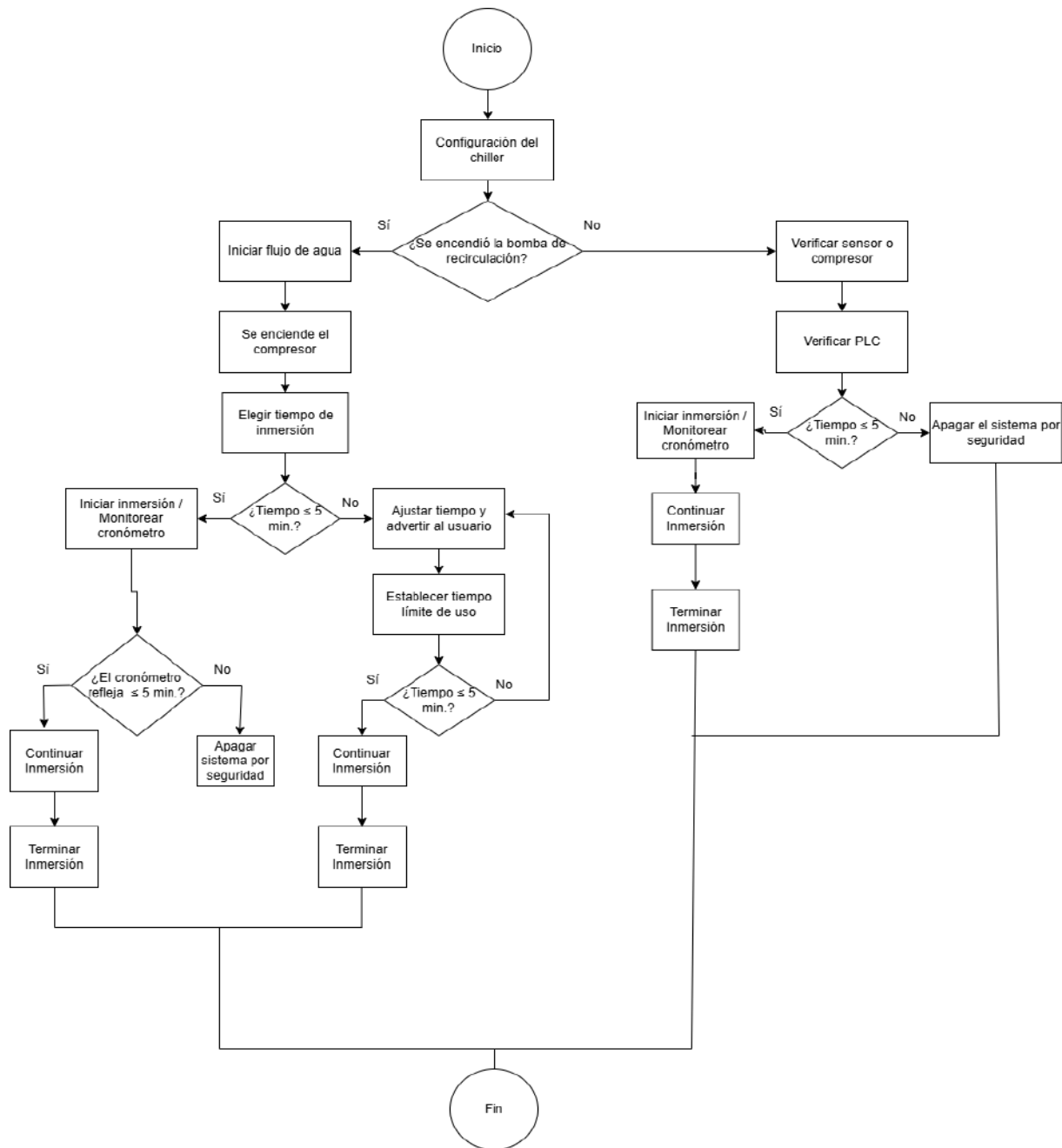


Figura 2: Diagrama de Flujo - Configuración mediante el PLC [Fuente: Los Autores].

En la Fig. 2 se puede apreciar el diagrama que describe el proceso de configuración y control del chiller durante el uso, donde se verifica el encendido de la bomba de recirculación para iniciar el flujo de agua y activar el compresor. El usuario decide el tiempo de inmersión. Si se detecta algún fallo en los sensores o en el PLC, el sistema también procede a detenerse para evitar riesgos. Todo el sistema tiene como finalidad mantener la seguridad del usuario y la estabilidad del sistema durante la operación.

## VI-B. Caracterización de Componentes Mecánicos, Electrónicos y de Supervisión

Los componentes del prototipo se dividen en subsistemas mecánicos, que ejecutan el ciclo térmico, y electrónicos, encargados del control lógico. A continuación se detallan las especificaciones de los elementos seleccionados e integrados en el sistema:

### Componentes Mecánicos y Estructurales

**Tina de Inmersión:** Referente a la tina vista en la Fig. 3 de alta capacidad (110 galones / 416 L) fabricado en PVC reforzado con protección UV, resistente al exterior. Dispone de un drenaje inferior y un borde estructural sólido para soporte. Su alto grado de aislamiento es crítico para la eficiencia energética; el PVC posee una conductividad térmica baja comparada con metales, lo que ayuda a mantener el agua fría más tiempo reduciendo la ganancia de calor por las paredes. Para los fines de este estudio, se validó el enfriamiento con un volumen operativo de 150 litros.



Figura 3: Tina de Inmersión de PVC reforzado [Fuente: Los Autores].

**Ventilador y Unidad Condensadora (MAER):** Un equipo de refrigeración de circuito cerrado con compresor, similar a un aire acondicionado acuático de **9000 BTU/h** (aprox. 2.64 kW de capacidad frigorífica). Este dispositivo visto en la Fig. 4, impulsado por un compresor de **0.9 HP**, remueve el calor del agua recirculándola a través del serpentín frío. La potencia de 9000 BTU/h es suficiente para bajar la temperatura del volumen de agua de la tina en un tiempo razonable, superando las cargas térmicas ambientales típicas.



Figura 4: Ventilador y unidad condensadora MAER [Fuente : Los Autores].

**Bomba de Circulación:** Un equipo de bombeo se encarga de extraer el agua desde la tina y enviarla hacia el intercambiador de calor del enfriador, manteniendo un flujo continuo que garantiza una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen del tanque y previene la estratificación térmica. Para esta aplicación se seleccionó la electrobomba periférica Pedrollo PKm 60, encargada de recircular el agua desde la tina hacia el intercambiador de calor, garantizando un flujo continuo que evita la estratificación térmica y asegura una distribución uniforme de la temperatura. La bomba posee una potencia nominal de 0.37 kW, un caudal máximo de hasta 40 L/min y una altura manométrica de hasta 40 m, parámetros suficientes para compensar las pérdidas de carga generadas en el serpentín y el filtro del sistema.

Su construcción, cuenta con cuerpo de hierro fundido con tratamiento anticorrosivo, impulsor de bronce y eje en acero inoxidable AISI 431, lo que garantiza durabilidad y resistencia mecánica. Además, incorpora protección térmica interna y grado de protección IP44 contra salpicaduras. Su operación está limitada a agua limpia, con temperaturas del fluido entre 10°C y +60°C y presión máxima de trabajo de hasta 6.5 bar, condiciones compatibles con los requerimientos del prototipo. La bomba de la Fig. 5 es adecuada para la tasa de flujo requerida (por ejemplo, menos de 100 L/min) y debe vencer la caída de presión.



Figura 5: Bomba de circulación del sistema [30].

#### Instrumentación y Control Electrónico

**Controlador de Temperatura MOES:** En la Fig. 6 se encuentra el interruptor inteligente equipado con una sonda de temperatura impermeable (marca MOES o equivalente). Este dispositivo mide la temperatura del agua en la tina y activa o desactiva la unidad enfriadora mediante un lazo de control ON/OFF con histéresis. Funciona mediante un relé conectado al circuito de mando y se programa para mantener la temperatura deseada dentro de una banda muerta específica, protegiendo los motores de arranques frecuentes.



Figura 6: Controlador de Temperatura MOES [Fuente: Los Autores].

**Accesorios y Seguridad:** El sistema integra mangueras y tuberías de PVC para conectar los componentes, sujetadores plásticos para montaje seguro, Adicionalmente, se implementaron **presostatos** como mecanismo de seguridad redundante ante fallos de flujo o pérdida de refrigerante, sustituyendo al sensor de flujo mecánico para mayor fiabilidad.

#### VI-C. Especificaciones Técnicas, Materiales y Análisis de Integridad del Chasis

Previo a la fabricación, se ejecutó un dimensionamiento preliminar con el fin de fijar la capacidad frigorífica mínima requerida y traducir dicho requerimiento a una selección viable de componentes comerciales. En esta etapa se relacionó el volumen útil de agua, el descenso térmico objetivo y el tiempo de enfriamiento con la capacidad del equipo, priorizando un diseño con margen operativo que permita recuperar la temperatura ante cargas térmicas súbitas durante el uso. Este criterio se fundamentó en balances de energía y en prácticas de selección de capacidad para sistemas de refrigeración compactos [31].

El dimensionamiento se complementó con un criterio hidráulico, debido a que el tiempo efectivo de enfriamiento no depende únicamente de la potencia frigorífica nominal, sino también del caudal de recirculación que asegura uniformidad térmica en la tina y eleva el coeficiente de transferencia de calor en el intercambiador. Por ello, la selección de bomba se consideró en conjunto con la caída de presión del circuito, la longitud equivalente de mangueras y accesorios, y el régimen de flujo requerido para reducir estratificación térmica [32].

Con la capacidad objetivo establecida, se verificaron dimensiones físicas de compresor, condensador y ventilador disponibles en el mercado local para definir el volumen interno del chasis. Esta compatibilización redujo retrabajos en fabricación y permitió reservar espacios para radios de curvatura de tuberías de cobre, accesibilidad a válvulas de servicio y ubicación de instrumentación, manteniendo

un empaque mecánico funcional para mantenimiento [33].

Con el fin de materializar el diseño mecánico y garantizar la integridad estructural del equipo, se procedió a la fase de construcción y selección de materiales. El evaporador fue diseñado y fabricado internamente para adaptarse a las especificaciones del sistema de crioterapia, implementando una configuración de flujo en contracorriente para maximizar el diferencial medio de temperatura logarítmica. Se utilizó Acero al Carbono con recubrimiento epóxico y pintura de poliuretano para la carcasa, lo que garantiza una resistencia superior a la corrosión provocada por la humedad constante del entorno de operación. El proceso de fabricación incluyó el corte preciso de las láminas mediante cizalla hidráulica, el doblado para formar las aletas y con uniones atornilladas (perno, tuerca y arandela), permitiendo ajustes de alineación, mantenimiento y desmontaje futuro. Para minimizar vibraciones[27].

Para el condensador, se realizó una adaptación a partir de un aire acondicionado comercial. Se desmanteló cuidadosamente el intercambiador de calor y se sometió a un proceso de lavado interno con nitrógeno a presión y solventes dieléctricos para eliminar residuos de aceite mineral higroscópico, el cual es incompatible con el aceite POE utilizado por el refrigerante R-410A. Posteriormente, se modificaron las conexiones para integrarlo al nuevo sistema.

El ventilador fue adquirido comercialmente, seleccionando un modelo axial que cumpliera con los requerimientos de flujo de aire y presión estática necesarios para vencer la resistencia del paquete de aletas del condensador. Se diseñó una estructura de soporte personalizada con amortiguadores de vibración para montarlo en la carcasa del chiller, y las uniones entre esta estructura, asegurando una fijación segura y una alineación precisa para el correcto desempeño aerodinámico del sistema, minimizando la contaminación acústica durante la operación continua.

La carcasa del chiller como se puede ver en la Fig. 7 fue construida utilizando láminas de Acero al Carbono con recubrimiento epóxico y pintura de poliuretano, cortadas y dobladas según el diseño establecido. Las uniones entre las piezas se realizaron con fueron mediante uniones atornilladas con perno, tuerca y arandela, permitiendo ajustes de alineación, mantenimiento y desmontaje futuro. Para minimizar vibraciones, el compresor fue fijado sobre soportes amortiguados, la cual permitió obtener una estructura resistente y estéticamente limpia, fundamental tanto para la integridad mecánica del equipo como para su presentación externa. Adicionalmente, se aplicó aislamiento térmico de espuma elastomérica de celda cerrada en las tuberías de succión para evitar la condensación superficial y la ganancia de calor indeseada desde el ambiente, mejorando así la eficiencia entálpica del ciclo [34].

La disposición física de los elementos se realizó sobre una estructura portante tipo castillo, entendida como un bastidor rígido donde se fija el compresor y se soportan condensador, ventilación, tuberías y componentes eléctricos. Esta metodología de montaje favorece la alineación, la accesibilidad a uniones

soldadas y la segregación de zonas térmicas, evitando que líneas frías entren en contacto directo con superficies metálicas no aisladas. Además, al tratarse de un equipo con compresor, se consideró la atenuación vibratoria mediante apoyos elastoméricos y la distribución de masa para evitar resonancias que incrementen ruido y fatiga en uniones [35].



Figura 7: Chiller ensamblado [Fuente: Los Autores].

La selección de la soldadura SMAW se justificó al momento de ensamblar el chasis construido en acero estructural mediante procesos de corte y doblado mecánico, utilizando herramientas convencionales de taller. Las uniones principales del bastidor se ejecutaron mediante soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), asegurando rigidez estructural en los puntos críticos de carga y vibración.

Posteriormente, los componentes principales —compresor, condensador, intercambiador de calor (evaporador), bomba de recirculación y tablero eléctrico— fueron instalados sobre el chasis mediante uniones atornilladas (perno, tuerca y arandela), permitiendo ajustes de alineación, mantenimiento y desmontaje futuro.

Para minimizar vibraciones, el compresor fue fijado sobre soportes amortiguados., minimizando la distorsión térmica en las chapas delgadas. Además, es especialmente adecuada para el Acero al

Carbono con recubrimiento epóxico y pintura de poliuretano utilizado en este proyecto, asegurando una penetración adecuada sin comprometer la integridad estructural del material base [3].

Para garantizar la integridad estructural de la carcasa del chiller, se realizó un análisis estático por elementos finitos (FEA) sobre la carcasa de soporte del condensador. El objetivo principal fue verificar que la geometría propuesta, fabricada en chapa metálica, es capaz de soportar las cargas operativas sin sufrir deformaciones plásticas ni comprometer la alineación del ventilador.

#### *VI-D. Ajustes de Ingeniería y Definición Final de la Lógica de Control*

Durante la fase de implementación física y pruebas preliminares, se realizaron ajustes críticos a la arquitectura de control original para priorizar la robustez operativa frente a la complejidad mecánica. A continuación se detallan las definiciones finales de ingeniería adoptadas para el prototipo:

*Redefinición del Sistema de Seguridad:* Se sustituyó la dependencia de presostatos electromecánicos por una estrategia de seguridad basada en lógica de control y temporización, eliminando puntos de falla asociados a la calibración de resortes o falsos contactos. La protección del equipo se fundamenta ahora en tres barreras activas:

1. **Protección Anti-Congelamiento (Lógica del Controlador):** Se configuró el controlador digital (MOES) con un límite inferior de setpoint bloqueado por software. Esta restricción impide físicamente que el usuario seleccione temperaturas cercanas al punto de cambio de fase del agua (0°C), evitando la formación de hielo en el intercambiador de placas/casco que podría fracturar la estructura de PVC.
2. **Gestión Temporal (Timer de Ciclo):** Se integró un temporizador industrial en la línea de mando principal. Este dispositivo interrumpe cíclicamente la alimentación del compresor, evitando marchas forzadas continuas que podrían sobrecalentar los devanados del motor, actuando como una protección térmica preventiva independiente de la demanda de frío.
3. **Sincronización Térmica:** El encendido del ventilador se acopló eléctricamente al del compresor mediante el mismo contactor. Esto garantiza que la disipación de calor en el condensador sea mandatoria siempre que exista compresión, eliminando el riesgo de disparos por alta presión debido a un ventilador apagado.

*Arquitectura de Potencia y Señalización:* El circuito de fuerza se optimizó mediante una topología de dos contactores para la gestión de cargas inductivas:

- **Contactador 1 (C1 - Hidráulico):** Controla exclusivamente la bomba de agua. Esto permite operar el filtrado y la recirculación de manera independiente sin activar el sistema de refrigeración.
- **Contactador 2 (C2 - Frigorífico):** Comanda en paralelo al compresor y al ventilador axial. Al estar puenteados, se asegura la extracción de calor inmediata al arranque.

Para la interfaz visual local, se implementó un panel de diagnóstico compuesto por luces piloto (Verde: Operación Normal / Roja: Stand-by o Falla) y un voltímetro digital conectado a la línea de neutro, permitiendo al operador monitorear en tiempo real la estabilidad del suministro eléctrico antes y durante la operación.

*Sistema de Expansión:* Para el control del flujo de refrigerante, se seleccionó un **Orificio de Expansión** calibrado en lugar de una válvula de expansión termostática. Dada la carga térmica constante del volumen de agua (150 L) y la inercia del sistema, el orificio fijo ofrece una solución libre de mantenimiento y menos sensible a las vibraciones, garantizando una caída de presión constante para la evaporación del R-410A.

*VI-D1. Análisis de Elementos Finitos:* Se seleccionó el Acero al Carbono ASTM A36 como material de fabricación debido a su alta rigidez y costo-efectividad, aplicando posteriormente un recubrimiento epóxico y pintura de poliuretano para la protección contra la corrosión. Las propiedades mecánicas utilizadas en la simulación se detallan en la Tabla II.

Tabla II: Propiedades Mecánicas del Acero al Carbono ASTM A36 [Fuente: Los Autores]

Propiedad	Valor
Módulo Elástico ( $E$ )	200 GPa
Coficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,26
Límite Elástico ( $\sigma_y$ )	250 MPa
Densidad ( $\rho$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>

Condiciones de Frontera y Cargas:

- **Sujeciones:** Se aplicó una geometría fija en las caras inferiores de la base, simulando el anclaje de la carcasa al chasis principal del chiller mediante pernos.
- **Cargas:** Se aplicó una fuerza distribuida normal de 5 N sobre la cara superior inclinada y las superficies de montaje del ventilador.

Justificación de la Carga: La fuerza de 5 N corresponde a la masa aproximada de un ventilador axial industrial de 120 mm ( $m \approx 0,51$  kg) junto con su tornillería de fijación. Esta carga representa el escenario estático de operación nominal.

Análisis de Resultados: La simulación se ejecutó utilizando un mallado sólido basado en curvatura con elementos de alto orden para garantizar la precisión en los pliegues de la chapa.

Esfuerzos de Von Mises:

Como se observa en la Figura 18, la tensión máxima registrada fue de 0.747 MPa, localizada en los nodos cercanos a los orificios de sujeción superior.

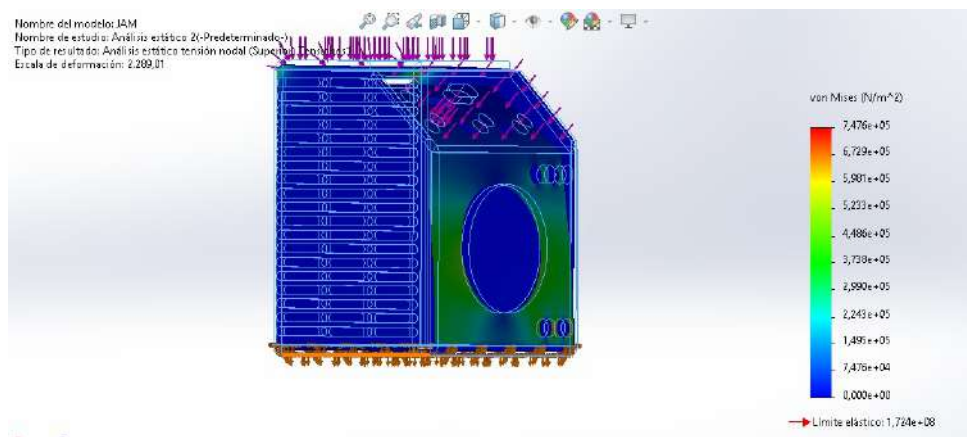


Figura 8: Distribución de tensiones de Von Mises en la carcasa del chiller [Fuente: Los Autores].

Desplazamientos:

El análisis de desplazamientos Figura 9 muestra una deformación máxima de 0.0146 mm en la arista superior libre. Este valor es despreciable (menor al 0.01 % de la longitud característica de la pieza), lo que confirma una alta rigidez estructural.

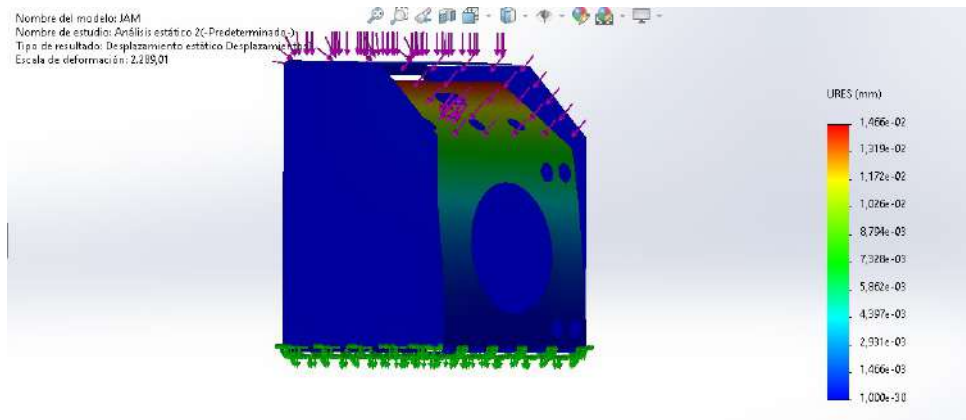


Figura 9: Desplazamientos resultantes bajo carga [Fuente: Los Autores].

Conclusión y Factor de Seguridad: Para validar el diseño, se calculó el Factor de Seguridad (FOS) comparando el límite elástico del material con el esfuerzo máximo obtenido:

$$FOS = \frac{\sigma_{\text{Límite\_Elástico}}}{\sigma_{\text{Von\_Mises\_Máx}}} = \frac{250 \text{ MPa}}{0,747 \text{ MPa}} \approx 334,6 \quad (4)$$

El factor de seguridad obtenido indica que el diseño está sobredimensionado para las cargas estáticas. Esto es intencional y beneficioso, ya que proporciona una rigidez adicional necesaria para absorber las vibraciones generadas por el compresor y el ventilador durante la operación dinámica, evitando resonancias y fatiga del material a largo plazo.

*Implementación de Termopozo para Sensado Térmico:* Para garantizar la integridad de la sonda de temperatura NTC y facilitar las labores de mantenimiento, se integró un **termopozo** en la línea de retorno de agua. Este dispositivo consiste en una vaina tubular de acero inoxidable (AISI 304) que se inserta perpendicularmente al flujo del fluido.

El termopozo cumple una doble función técnica:

1. **Aislamiento Hidráulico:** Crea una barrera física que impide el contacto directo del sensor electrónico con el agua, protegiéndolo contra la corrosión galvánica y el estrés mecánico provocado por la turbulencia del caudal de 12 GPM.
2. **Transferencia Conductiva:** Gracias a la alta conductividad térmica del acero y al uso de pasta térmica en su interior, el dispositivo transfiere el calor del agua hacia el elemento sensor con un retardo térmico despreciable, permitiendo una lectura precisa sin riesgo de fugas durante el reemplazo de la sonda.

#### VI-E. Implementación del Sistema de Filtrado de Sedimentos

Dada la naturaleza de la aplicación (inmersión corporal en tina abierta), el agua está expuesta constantemente a la introducción de contaminantes orgánicos (células dérmicas, cabello, aceites corporales) y partículas en suspensión. Para mitigar el riesgo operativo que esto representa, se integró un **\*\*filtro de sedimentos lavable\*\*** en la línea de succión hidráulica, previo al ingreso de la bomba de circulación.

Esta etapa de filtrado cumple tres funciones críticas de ingeniería para la estabilidad del prototipo:

1. **Protección del Intercambiador de Calor:** El evaporador de tipo carcasa y tubo posee espacios anulares definidos para el flujo de agua. La acumulación de sedimentos en estas zonas generaría una capa de ensuciamiento (*fouling*) que actúa como aislante térmico, reduciendo drásticamente la eficiencia de enfriamiento ( $k$ ). Más críticamente, una obstrucción severa reduciría el caudal por debajo de los 12 GPM nominales, lo que podría provocar el congelamiento inmediato del agua dentro de la carcasa de PVC debido a la falta de carga térmica, resultando en una falla catastrófica del componente.
2. **Integridad de la Bomba:** Al instalar el filtro en la succión, se protege el impulsor de la bomba de 4.5 A contra el impacto o atascamiento por objetos sólidos, garantizando que la curva de operación caudal-presión se mantenga estable durante el ciclo de trabajo.
3. **Calidad Sanitaria del Agua:** Aunque el propósito principal es mecánico, el filtro actúa como la primera barrera física para mantener la turbidez del agua dentro de parámetros aceptables para el usuario.

Siguiendo los protocolos operativos del fabricante, el diseño hidráulico permite el fácil acceso al vaso del filtro para su inspección visual y limpieza semanal, asegurando que la caída de presión en este punto no exceda los límites de diseño del sistema de bombeo.

#### VI-F. Montaje del circuito frigorífico y secuencia de interconexión

El montaje del circuito frigorífico se ejecutó de forma progresiva, priorizando el ensamble mecánico y el trazado de tuberías antes de la integración eléctrica y de control. La metodología se aplicó por tramos, verificando en cada etapa la compatibilidad geométrica y la accesibilidad a uniones y componentes. En términos prácticos, la interconexión se abordó con un criterio análogo al montaje de tuberías hidráulicas, identificando para cada tramo los accesorios, uniones y derivaciones requeridas, pero aplicando prácticas específicas de refrigeración relacionadas con limpieza interna, control de humedad y sellado del circuito [36].

#### VI-G. Protocolo de Integridad Hidráulica y Uso de Glicol

Para operar en el rango terapéutico de 5°C, el agua pura representa un riesgo latente de congelamiento en las paredes del intercambiador si el flujo se detiene momentáneamente. Se estableció como norma operativa la adición de Glicol de Propileno, un anticongelante atóxico de grado alimenticio.

Como se detalla en la Tabla de Referencia (Figura 10), una concentración mínima del 5 % al 10 % asegura que el punto de fusión del fluido descienda entre -1°C y -3°C, creando un margen de seguridad térmica indispensable para proteger la tubería de cobre ante fallas de la bomba.

GLICOL DE ETILENO		
% DE GLICOL	% AGUA	° C
0	100	0
5	95	-1.1
10	90	-2.2
15	85	-3.9
20	80	-6.7
25	75	-8.9
30	70	-12.8
35	65	-16.6
40	60	-20.6
45	55	-26.7
50	50	-33.3

GLICOL DE PROPILENO		
% DE GLICOL	% AGUA	° C
0	100	0
5	95	
10	90	-3
15	85	
20	80	-8
25	75	
30	70	-14
35	65	
40	60	-22
45	55	
50	50	-34

Figura 10: Relación entre el porcentaje de Glicol y el punto de congelación del agua [Fuente: Los Autores].

#### VI-H. Diagrama Termodinámico y de Proceso

La configuración termodinámica del chiller se basa en un ciclo de compresión de vapor simple, optimizado para aplicaciones de temperatura media con refrigerante R-410A. La Figura 11 ilustra la interacción entre el circuito frigorífico y el circuito hidráulico.

El ciclo inicia en el compresor, que eleva la presión del gas refrigerante proveniente de la succión. A la salida, el gas caliente ingresa al condensador enfriado por aire, donde cede calor al ambiente y cambia de fase a líquido subenfriado. Antes de la expansión, se integró un filtro deshidratador en la línea líquida; este componente es crítico en sistemas con lubricantes POE (polioléster) debido a su alta higroscopicidad, reteniendo cualquier traza de humedad que pudiera generar hidrólisis y acidez en el aceite.

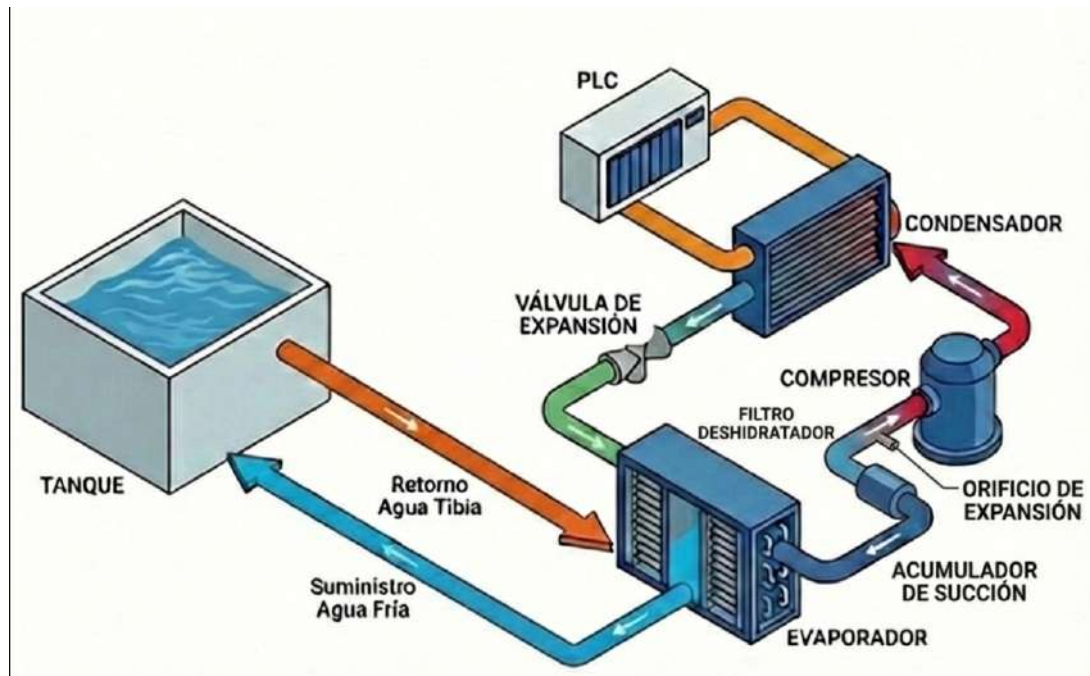


Figura 11: Diagrama de flujo del ciclo frigorífico e interacción hidráulica [Fuente: Los Autores].

La caída de presión ocurre en la válvula de expansión, dosificando el flujo hacia el evaporador de placas o casco. En este intercambiador se produce la transferencia térmica útil: el refrigerante absorbe calor latente del agua de retorno del tanque, enfriándola para su reingreso a la tina.

Dentro del montaje se incorporó un filtro deshidratador en la línea líquida como barrera de protección contra humedad e impurezas, particularmente relevante en sistemas con aceite POE y refrigerante R-410A. Este componente contribuye a minimizar formación de ácidos y degradación del aceite, reduciendo el riesgo de obstrucción del dispositivo de expansión y prolongando la vida útil del compresor.

#### VI-I. Implementación del acumulador de succión y protección del compresor

Debido a la criticidad del compresor tipo scroll y a la posibilidad de retorno de refrigerante en fase líquida durante transitorios, se incorporó un acumulador de succión como dispositivo de seguridad pasiva. Este componente actúa como volumen intermedio que retiene líquido no evaporado y permite su vaporización gradual, asegurando que a la cámara de compresión ingrese predominantemente vapor. Esta protección disminuye la probabilidad de golpe de líquido, fenómeno que puede causar daño mecánico severo por la baja compresibilidad del líquido y por pérdida de película lubricante en superficies internas [37].

La integración del acumulador se realizó en la línea de succión, respetando orientación y altura de montaje recomendadas para facilitar el retorno controlado de aceite al cárter del compresor. Este criterio es particularmente importante en R-410A, donde la correcta miscibilidad del aceite POE con el refrigerante favorece el retorno, pero exige un circuito seco y libre de humedad para evitar degradación química del lubricante.

#### *VI-J. Integración hidráulica y criterios de homogeneidad térmica*

El circuito hidráulico se implementó con el objetivo de asegurar mezcla efectiva del volumen de agua operativo, reduciendo gradientes térmicos y mejorando la estabilidad del control. La recirculación continua mantiene un perfil térmico uniforme en la tina, evitando estratificación y permitiendo que el intercambiador opere con condiciones reproducibles de entrada y salida. Este criterio incrementa la repetibilidad de las pruebas de enfriamiento y reduce el error de medición por ubicaciones locales de sensor [26].

La selección de bomba se realizó considerando el caudal requerido y la altura manométrica asociada a pérdidas por fricción en mangueras, accesorios y el propio intercambiador. Adicionalmente, se mantuvieron condiciones de succión favorables para reducir riesgo de cavitación, estableciendo una instalación que minimiza restricciones en la entrada de la bomba y limita pérdidas singulares en la línea de aspiración.

#### *VI-K. Arquitectura Eléctrica y Diagramas de Conexión*

El diseño del sistema de control y fuerza se desarrolló bajo los lineamientos de la norma IEC 60204-1, priorizando la seguridad del operador y la protección de los componentes. Se estableció una estricta separación física y galvánica entre el circuito de potencia (220 VAC) y el circuito de mando (24 VDC / Señal). A continuación, se describen los cuatro planos que conforman la ingeniería eléctrica del prototipo:

##### *Distribución de Componentes (Layout)*

La disposición física de los elementos dentro del tablero (Figura 12) se diseñó para optimizar la disipación térmica y facilitar el mantenimiento. Como se observa en el diagrama, los componentes de potencia (Contactores C1, C2, C3 y Disyuntores BR1, BR2, BR3) se ubicaron en la parte inferior y media del gabinete. Esto permite que el calor generado por los arcos eléctricos ascienda sin afectar a la electrónica sensible. Los componentes de control (Relés, Temporizador TD y Supervisor de Voltaje) se situaron en el riel superior, manteniendo las distancias de seguridad dieléctrica requeridas.

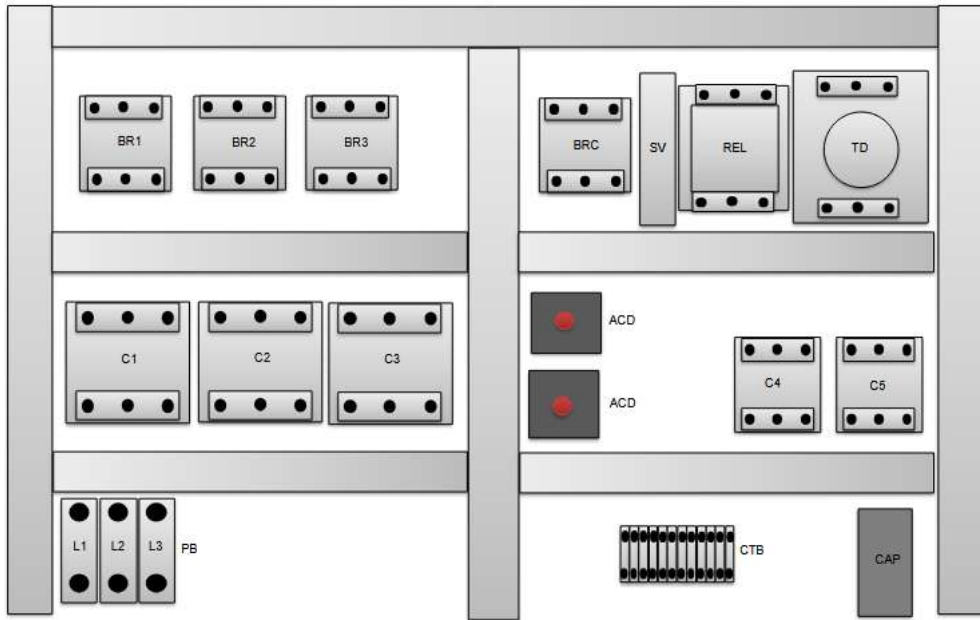


Figura 12: Layout de distribución interna del tablero de control [Fuente: Los Autores].

*Circuito de Potencia:* El diagrama de fuerza Figura 13 detalla la alimentación monofásica a 220VAC. El sistema cuenta con protecciones independientes:

- Compresor(0.9 HP): Protegido por el disyuntor BR1 (50A) y comandado por el contactor C1.
- Bomba de Agua: Protegida por el disyuntor BR3 (25A) y comandado por el contactor C3.

Esta configuración asegura que una falla en la bomba no desconecte la alimentación principal, permitiendo el diagnóstico sectorizado.

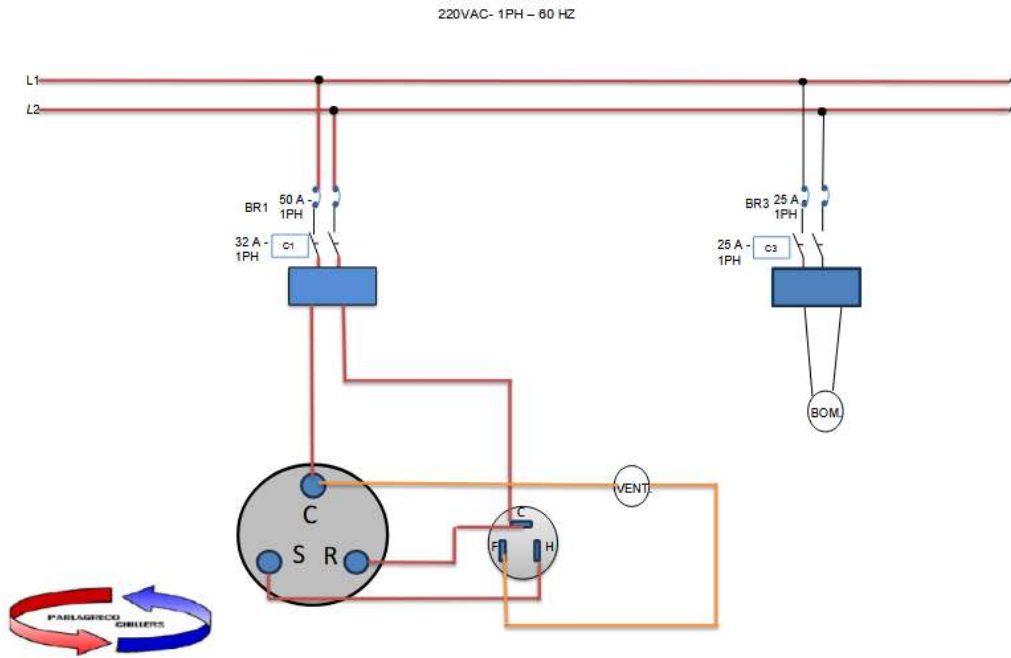


Figura 13: Diagrama del circuito de potencia [Fuente: Los Autores].

*Lógica de Control y Seguridad:* El diagrama de escalera Figura 14 representa la lógica de operación. La activación de la bobina del contactor del compresor (C1/CC) está condicionada por una cadena de seguridad en serie. Se eliminó el sensor de flujo mecánico por su baja fiabilidad; en su lugar, la protección hidráulica y frigorífica se confía a los presostatos:

- Presostato de Alta (PA): Abre el circuito si la presión de descarga supera el límite seguro (ej. obstrucción en condensador).
- Presostato de Baja (PB): Abre el circuito si la presión de succión cae bruscamente (indicativo de fuga de gas o falta de flujo de agua en el evaporador).
- Temporizador (ACD): Introduce un retardo a la conexión para evitar ciclos cortos que dañen el compresor.

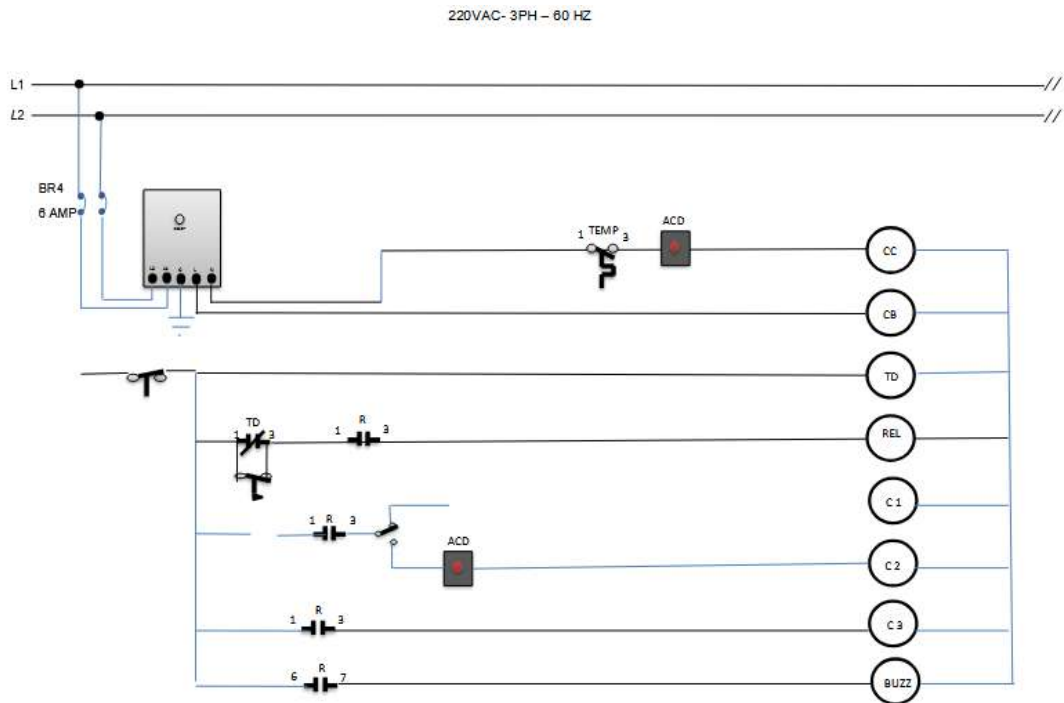


Figura 14: Diagrama de escalera (Lógica de Control) [Fuente: Los Autores].

*Interconexión del Controlador Digital:* Finalmente, la Figura 15 detalla el conexionado físico del termostato digital. Se observa la conexión de la sonda de temperatura (Sensor) y la gestión de las salidas a relé. El controlador actúa como el cerebro del sistema, enviando la señal de arranque (F1/F2) hacia la cadena de seguridades descrita anteriormente, garantizando que el compresor solo arranque cuando existe demanda térmica y condiciones seguras.

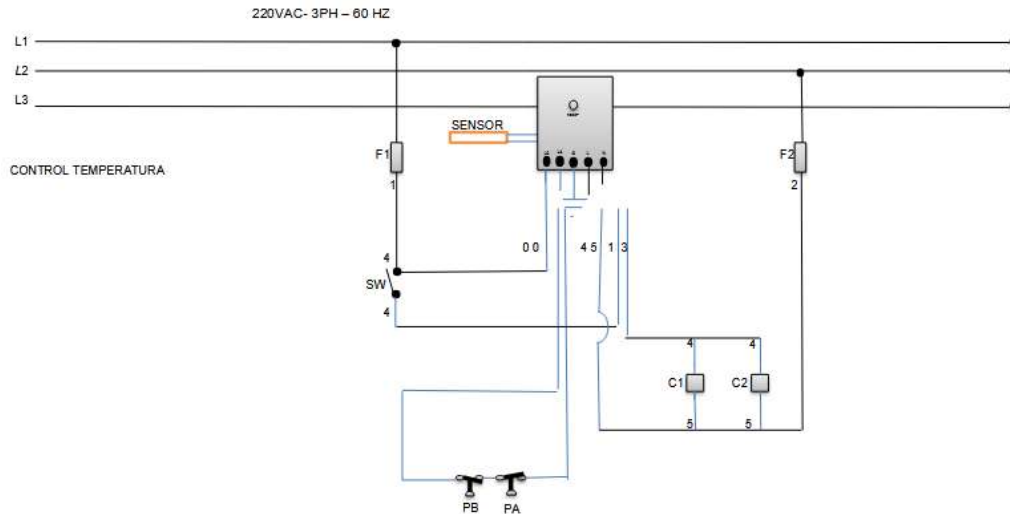


Figura 15: Diagrama de conexiones del controlador de temperatura [Fuente: Los Autores].

De forma complementaria, se tomaron medidas para el corte y mecanizado de las láminas que conforman la caja de control remoto, cuidando la disposición interna de los componentes para facilitar la disipación térmica y la accesibilidad para futuras tareas de mantenimiento correctivo. Asimismo, se implementó un sistema de puesta a tierra equipotencial conectando todas las partes metálicas del chasis y la tina a una barra común, una medida de seguridad indispensable al trabajar con equipos eléctricos en contacto directo o indirecto con agua para prevenir riesgos de electrocución [29].

En línea con el objetivo de dotar al sistema de capacidades de monitoreo inteligente, se integró la aplicación Smart Life para habilitar el control remoto del equipo de refrigeración. Esto permite al usuario monitorizar parámetros como temperatura, flujo de agua o estado del compresor desde un dispositivo móvil conectado a Internet. Según la plataforma de desarrollo de Tuya, esta app facilita la conexión a través de protocolos seguros, control diferido y gestión integral de dispositivos inteligentes mediante escenarios, análisis en tiempo real y acceso multiplataforma [38].

#### VI-L. *Protocolos de Puesta en Marcha, Instrumentación y Verificación de Variables*

##### *Proceso de vacío, carga y validación de estanqueidad*

Una vez completado el ensamblaje mecánico y eléctrico, y previo a la puesta en marcha, se ejecutó la fase de preparación del circuito frigorífico. Una de las primeras etapas críticas consistió en preparar el circuito mediante la realización del vacío profundo en el condensador y las tuberías del sistema. Para ello se conectó una bomba de vacío de doble etapa con capacidad de 6 CFM, con el objetivo de extraer completamente el aire, la humedad y cualquier gas no condensable que pudiera afectar el funcionamiento del ciclo de refrigeración. Este procedimiento es fundamental, ya que la presencia

de aire dentro del sistema puede generar inestabilidad térmica, aumento de la presión de descarga y reducción del coeficiente de desempeño [25].

El vacío se mantuvo hasta alcanzar valores considerados adecuados para este tipo de instalación con aceite POE, situados entre 250 y 500 micrones. Una vez alcanzado este nivel, se realizó una prueba de decaimiento durante 30 minutos para asegurar que no existieran microfugas ni evaporación remanente de humedad. Se utilizó un árbol de carga de cuatro vías apto para las altas presiones de trabajo del R-410A, garantizando que las mangueras y sellos soportaran el estrés mecánico durante el servicio.

Una vez verificado el nivel de vacío y la integridad del circuito, se procedió a la carga del refrigerante. Para esta etapa se utilizó un tanque de refrigerante R-410A de 20 libras. Dado que el R-410A es una mezcla azeotrópica, la carga se realizó obligatoriamente en fase líquida invirtiendo el cilindro, para garantizar que la proporción de los componentes ingresara correctamente al sistema. El procedimiento se ejecutó de manera progresiva, monitoreando simultáneamente la presión de succión y el consumo de amperaje del compresor, con el fin de evitar el golpe de líquido y asegurar un régimen de trabajo estable dentro de la curva de diseño.

En la Fig ?? muestra el control preciso del vacío en el cual se empleó un micrómetro digital o vacuómetro, un instrumento que permitió verificar en tiempo real el nivel alcanzado dentro del circuito con una resolución imposible de lograr con manómetros analógicos convencionales. Este equipo fue clave para confirmar que el sistema se encontraba libre de humedad antes de romper el vacío con el refrigerante. Adicionalmente, se utilizó un detector infrarrojo de fugas de refrigerante Elitech ILD-200, el cual permitió inspeccionar las uniones soldadas y las conexiones roscadas del sistema con una sensibilidad de 4 gramos/año. Con este dispositivo se pudo certificar la estanqueidad del circuito, cumpliendo con las normativas ambientales de contención de gases fluorados.

Finalmente, para validar los límites operativos del sistema, se ajustó el presostato de seguridad encargado de supervisar las presiones de alta y baja del sistema. Se establecieron rangos de operación seguros para detener el compresor inmediatamente en caso de pérdida de refrigerante o bloqueo del condensador. Este ajuste electromecánico actúa como una redundancia de seguridad independiente del PLC, asegurando que el equipo opere dentro de límites adecuados y evitando daños catastróficos por sobrepresión.

#### *Instrumentación, validación funcional y registro de variables*

La instrumentación se orientó a dos propósitos: control de la variable de proceso y trazabilidad de desempeño. La variable principal fue la temperatura del agua, medida mediante sonda impermeable

instalada en una zona representativa del volumen útil, evitando proximidad inmediata a la descarga de agua fría para reducir sesgos por gradientes locales. Para respaldo operativo y diagnóstico se consideraron variables auxiliares: presión de succión y descarga, así como señales asociadas a la operación de bomba y compresor. Esta estrategia permite identificar restricciones hidráulicas, pérdida de refrigerante, ensuciamiento del condensador o degradación del intercambio térmico con base en patrones de operación.

La verificación funcional de la medición se realizó comparando la lectura de la sonda principal contra un termómetro patrón de inmersión en varios puntos del rango de operación. En condiciones de estabilización, se evaluó la coherencia entre la temperatura de tina y la temperatura de retorno del lazo hidráulico, confirmando que el caudal de recirculación mantiene homogeneidad térmica. A nivel de presiones, se contrastó el comportamiento observado con manometría durante arranque y operación estable, verificando que las protecciones por presostato actúan como redundancia frente a eventos anómalos.

#### *VI-M. Pruebas de Integridad Estructural, Monitoreo de Datos y Estabilidad Térmica*

La validación experimental se ejecutó mediante pruebas de enfriamiento y estabilidad térmica sobre el volumen operativo definido. En una primera prueba se registró el tiempo requerido para alcanzar la temperatura objetivo desde una condición inicial cercana a la temperatura de red, cuantificando el comportamiento de descenso térmico y verificando coherencia con la capacidad nominal seleccionada. En una segunda prueba se evaluó estabilidad en régimen, observando el comportamiento de la banda de histéresis y la respuesta del sistema ante pequeñas perturbaciones térmicas, con el fin de minimizar oscilaciones y prevenir ciclos de arranque frecuentes [39].

Para simular condiciones de uso se aplicaron perturbaciones controladas asociadas a cambios de carga térmica, verificando la capacidad de recuperación hacia el setpoint. La evaluación incluyó observación del comportamiento del compresor y de la bomba, verificación de ausencia de disparos de seguridad en operación normal y confirmación de actuación efectiva de protecciones ante condiciones inducidas, como reducción de flujo o incremento de presión por limitación de rechazo térmico. Estos criterios garantizan que la operación del prototipo sea estable, reproducible y compatible con un entorno terapéutico [7].

A diferencia de los métodos tradicionales con manometría analógica, para este proyecto se validó la deshidratación del sistema utilizando instrumentación digital de alta precisión. Se empleó un manómetro inteligente Elitech MS-4000, capaz de medir el vacío profundo en unidades de micrones de mercurio, lo cual es indispensable para garantizar la ausencia de humedad en sistemas que operan

con aceite polioléster (POE) y refrigerante R-410A.

Como se evidencia en la Figura 16, el proceso de evacuación se mantuvo hasta alcanzar una lectura de 300 micrones, superando el estándar de la industria de 500 micrones. Este nivel de vacío profundo asegura la volatilización de la humedad residual en los poros de la tubería y previene la formación de ácidos que podrían degradar el bobinado del compresor a largo plazo. Adicionalmente, el instrumento permitió visualizar la gráfica de tasa de decaimiento (vacuum decay), confirmando que, tras aislar la bomba, el sistema mantuvo el vacío estable, certificando así la hermeticidad de las uniones soldadas y roscadas.



Figura 16: Certificación de vacío profundo (300 micrones) en el display del Elitech MS-4000 [Fuente: Los Autores].

La integración del sistema con la plataforma IoT se validó mediante la verificación cruzada entre las condiciones físicas del equipo y la visualización remota en la aplicación móvil. Durante la etapa de vacío, los transductores de presión instalados en el chiller transmitieron los datos al controlador y posteriormente a la nube.

La interfaz de usuario en tiempo real, donde se observa una lectura de -14.5 psi tanto en la línea de alta como en la de baja presión. Este valor negativo (correspondiente a presión de vacío relativa

cercana a -1 bar) confirma tres aspectos técnicos: la correcta calibración de la señal de 4-20mA de los sensores, la integridad de la transmisión de datos vía Wi-Fi y la capacidad del sistema para monitorear estados críticos de mantenimiento de forma remota.

#### *VI-N. Estándares de montaje electromecánico y compatibilidad electromagnética*

La construcción del tablero de control se ejecutó siguiendo criterios de organización industrial para minimizar fallos por vibración o interferencia. Como se aprecia en la Figura ??, se utilizaron contactores de la marca CHNT montados sobre riel DIN, asegurando una fijación robusta. El cableado de control y potencia se organizó mediante el uso de cintillos y rutas definidas, evitando que los cables queden tensos o en contacto con superficies cortantes.

Un aspecto crítico del diseño fue la gestión térmica y la separación física de componentes. Se observa cómo las tuberías de refrigeración, aisladas térmicamente con espuma elastomérica negra, se encuentran separadas de los componentes eléctricos para evitar que la condensación genere cortocircuitos. Asimismo, la disposición permite un acceso despejado a las válvulas de servicio y a los puertos de medición, facilitando las labores de mantenimiento predictivo y correctivo sin necesidad de desmontar el cableado de control.

#### *VI-Ñ. Selección de Accesorios y Adaptadores para la Interconexión Hidráulica*

Para la integración entre la unidad enfriadora y el tanque reservorio, se optó por un diseño de interconexión flexible utilizando componentes de polipropileno (PP) y vinilo reforzado. Esta selección responde a la necesidad de amortiguar las vibraciones generadas por la bomba y el compresor, evitando que se transmitan a la estructura rígida del tanque, lo que podría causar fisuras a largo plazo.

A continuación, se detalla la lista de materiales adquiridos e instalados, con su respectiva justificación técnica basada en la factura de materiales en la Tabla III:

Tabla III: Lista de Materiales y Accesorios de Interconexión Hidráulica [Fuente: Los Autores]

Componente	Especificación	Función Técnica
Manguera de Vinilo Trenzada	1/2 pulgada	Conducción flexible del fluido. Su pared reforzada soporta la presión de descarga sin colapsar en la succión, permitiendo además la inspección visual del flujo.
Válvula de Esfera (Bola)	1/2 H-H (Palanca)	Elemento de corte instalado a la salida del tanque. Permite aislar el reservorio para realizar la limpieza del filtro sin necesidad de drenar los 110 galones de agua.
Neplo Perdido con Tuerca	PP 1/2 pulgada	Actúa como pasamuros (bulkhead) estanco. La tuerca permite fijar el accesorio a través de la pared del tanque, creando una conexión roscada firme para la entrada y salida.
Abrazaderas Metálicas (Titan)	12-20mm / 14-27mm	Garantizan el sellado hermético en los empalmes entre la manguera y los espigos, compensando la expansión térmica del vinilo por los cambios de temperatura.
Bushing y Reductores	PP 3/4 a 1/2 pulgada	Adaptadores de diámetro necesarios para acoplar las salidas estándar de la bomba y el filtro (3/4) a la línea de manguera de 1/2 pulgada.
Codos y Tees	PP 90 grados y T	Accesorios para direccionar el flujo dentro del tanque, optimizando la mezcla del agua fría y evitando zonas estancas.
Cemento de Contacto	El Africano (800cc)	Adhesivo industrial utilizado para fijar la lámina de aislamiento térmico (Robotex) a la superficie curva del tanque de polietileno.

*VI-ÑI. Estrategia de Montaje y Flujo:* La implementación de los Neplos Perdidos con Tuerca fue fundamental para resolver el desafío de conectar tubería a un tanque de paredes delgadas y curvas sin generar fugas. Al instalar estos accesorios con empaques de goma, se logró una estanqueidad superior a la de los pasamuros de PVC estándar.

Asimismo, la inclusión de la Válvula de Esfera en la línea de succión responde a un criterio de mantenibilidad (Design for Maintenance). Sin esta válvula, cualquier intervención en la bomba o el filtro requeriría vaciar todo el sistema, lo cual es ineficiente operativamente. Finalmente, el uso

de Manguera Trenzada transparente permite al operador verificar instantáneamente el cebado de la bomba, identificando la presencia de burbujas de aire que pudieran causar cavitación.

#### VI-O. *Montaje e Integración del Sistema de Filtrado Hidráulico*

Para asegurar la calidad del fluido de trabajo y proteger los componentes rotativos (bomba) y estáticos (intercambiador) contra partículas suspendidas, se procedió a la instalación mecánica de un filtro de sedimentos de la marca FOSET (Modelo 49215). El proceso de montaje se rigió estrictamente bajo los lineamientos del fabricante y las buenas prácticas de plomería industrial.

*Procedimiento de Instalación:* La integración del filtro al chasis del chiller se ejecutó siguiendo una secuencia técnica para garantizar la estanqueidad y el correcto flujo:

1. **Ubicación y Nivelación:** Se seleccionó la línea de succión (entrada de agua) como punto de montaje. Como se observa en la Figura 17, se utilizó un nivel de burbuja de precisión durante la fijación del soporte al chasis. Esto es crítico para asegurar que el vaso del filtro quede perfectamente perpendicular al suelo, evitando esfuerzos mecánicos en las roscas y facilitando el desenrosque vertical durante el mantenimiento futuro.
2. **Conexión Hidráulica:** Se respetó la direccionalidad del flujo marcada en la tapa del filtro (Entrada → Salida). Se aplicó cinta de teflón en los conectores macho de 3/4" NPT para garantizar un sello hermético, evitando el apriete excesivo que podría fracturar la rosca plástica.
3. **Parámetros de Seguridad:** Se verificó que las condiciones de operación del sistema no excedan los límites nominales del filtro, especificados en su hoja técnica (Figura ??):
  - Presión máxima de trabajo: 100 PSI (7,0 kgf/cm<sup>2</sup>).
  - Temperatura máxima de operación: 52 °C.

#### VI-P. *Aislamiento Térmico del Tanque Reservorio (Robatex)*

Dado que el sistema está diseñado para mantener el agua a temperaturas cercanas a los 5 °C en un ambiente tropical (aprox. 30 °C), la ganancia de calor por las paredes del tanque representa la mayor carga térmica pasiva. Para mitigar esto, se aplicó un revestimiento de aislamiento térmico elastomérico de celda cerrada, comercialmente conocido como plancha de Robatex.

*Técnica de Aplicación del Aislamiento:* El proceso de forrado del tanque de polietileno de alta densidad (HDPE) de 55 galones se realizó mediante las siguientes etapas:

1. **Selección del Material:** Se utilizó una lámina de espuma elastomérica negra. Este material fue seleccionado por su baja conductividad térmica y su alta resistencia a la difusión de vapor



Figura 17: Nivelación y fijación del filtro al chasis [Fuente: Los Autores].

de agua, indispensable para prevenir la condensación superficial (sudoración) en las paredes externas.

2. **Adhesión y Sellado:** La lámina se cortó a medida de la circunferencia del tanque. La fijación se realizó mediante cemento de contacto aplicado en ambas superficies. Como se muestra en la Figura ??, se aseguró un sellado hermético en la junta longitudinal para evitar puentes térmicos por donde pudiera infiltrarse aire húmedo.

#### *VI-Q. Integración Final del Sistema Prototipo*

Tras la instalación de los componentes auxiliares y el aislamiento, se procedió a la interconexión hidráulica final entre el Chiller y el tanque reservorio como se ve en la mediante mangueras flexibles transparentes de 1/2". Esto permitió verificar visualmente el retorno del flujo y la ausencia de burbujas de aire en la línea durante las pruebas de carga como se observa en la Fig. ??.

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Análisis y Discusión de Resultados

Se presentan los datos cuantitativos obtenidos tras la fabricación y puesta en marcha del prototipo. Los resultados se han estructurado en tres dimensiones de validación: integridad mecánica, calidad del ensamblaje frigorífico y funcionalidad operativa.

### VII-B. Resultados de la Validación Mecánica (FEA)

El análisis estático mediante el método de elementos finitos permitió verificar el comportamiento del soporte del condensador bajo cargas de servicio. A partir de la simulación realizada en SolidWorks con acero inoxidable AISI 316, se obtuvieron los siguientes valores críticos:

- **Tensión de Von Mises Máxima:** 0.747 MPa.
- **Desplazamiento Máximo:** 0.0146 mm.
- **Factor de Seguridad (FOS):** 230.7.

La Figura 18 muestra la distribución de esfuerzos. El valor máximo de tensión (0.747 MPa) representa apenas un 0.43 % del límite elástico del material (172.4 MPa). Esto confirma que la estructura trabaja en una zona puramente elástica, sin riesgo de deformación permanente, validando la selección del calibre de lámina y el diseño de los pliegues para soportar el peso del ventilador y las vibraciones del compresor.

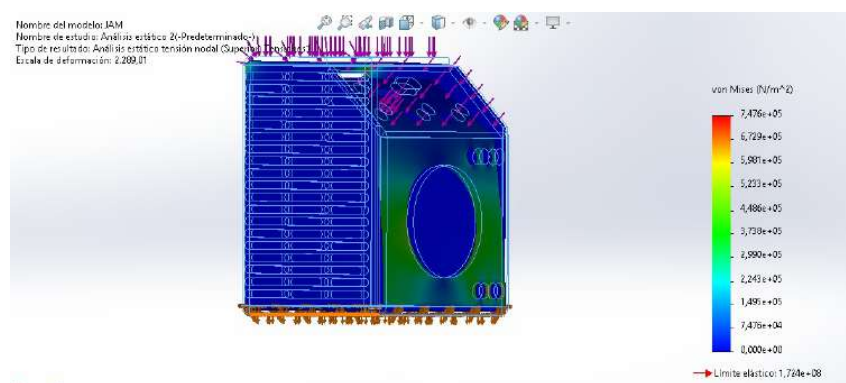


Figura 18: Mapa de tensiones de Von Mises mostrando zonas de bajo estrés mecánico [Fuente: Los Autores].

### VII-C. Protocolos Operativos y Especificaciones Técnicas Finales

Para garantizar la vida útil del equipo y la seguridad del usuario, se establecieron parámetros de operación obligatorios basados en las especificaciones del fabricante y en las pruebas de campo.

1. *Ficha Técnica y Nomenclatura del Equipo:* El prototipo final se clasifica bajo el modelo CARHP-24K-4-40, nomenclatura como se muestra en la Fig. 19 define sus capacidades operativas: Chiller de 24,000 BTU/h (2 Toneladas), diseñado para inmersión tubular. El sistema opera con un compresor rotativo de 1.8 HP y utiliza 1100g de refrigerante R-410A, optimizado para una carga térmica de alto rendimiento.

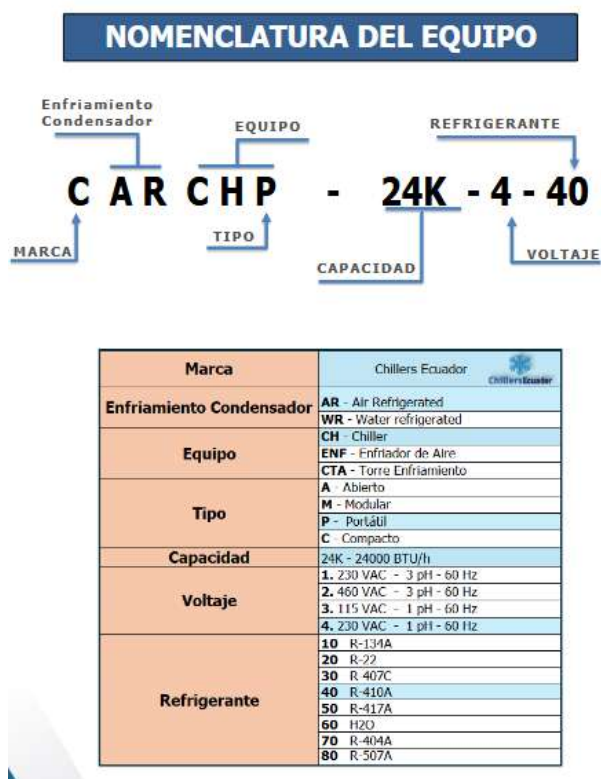


Figura 19: Nomenclatura de los Chiller [Fuente: Los Autores].

2. *Mantenimiento Preventivo y Uso de Glicol:* Debido a que el equipo tiene la capacidad de enfriar el agua hasta los 5°C, existe un riesgo físico de congelamiento en las paredes del intercambiador si el flujo se detiene o la temperatura desciende bruscamente. Para mitigar esto, se estableció como norma operativa el uso de una mezcla de agua con **\*\*Glicol de Propileno al 5%\*\*** como mínimo. Esta adición reduce el punto de fusión del fluido, actuando como un anticongelante de seguridad.

3. *Normas de Seguridad Hidráulica:* Se identificó que la restricción del flujo de agua es la causa principal de fallas por cavitación en la bomba y congelamiento del evaporador. Por tanto, se definió la restricción técnica de operar siempre con las válvulas de succión y descarga abiertas al 100%. El encendido del sistema debe seguir una secuencia estricta: primero se activa la circulación hidráulica (bomba) y, solo tras confirmar flujo, se habilita el circuito de refrigeración.

4. *Configuración de Telemetría (Smart Life):* El control fino de la temperatura se realiza mediante la aplicación Smart Life. A diferencia de un termostato mecánico, este sistema permite calibrar la sonda (ej. offset de  $-1.1^{\circ}\text{C}$ ) para corregir desviaciones de lectura. Además, se configuró un modo de control con histéresis de  $2^{\circ}\text{C}$  (encendido a  $16^{\circ}\text{C}$ , apagado a  $14^{\circ}\text{C}$ ) para evitar el ciclaje corto del compresor, protegiendo el motor y reduciendo el consumo eléctrico.

#### VII-D. *Telemetría y Calibración Digital (Smart Life)*

El control del proceso se realiza mediante la plataforma IoT Smart Life, la cual permite una gestión precisa que supera a los termostatos mecánicos. La interfaz gráfica Figura ?? centraliza el monitoreo de las variables críticas en tiempo real y permite la activación remota de los contactores.

Entre las capacidades configurables validadas en la aplicación se encuentran:

- **Calibración de Sonda (Offset):** El sistema permite ajustar digitalmente la lectura del sensor (parámetro visible de  $-1,1^{\circ}\text{C}$ ) para compensar la resistencia térmica del termopozo y ofrecer una lectura idéntica a la del agua en la tina.
- **Histéresis Programable:** Se configuró una banda muerta de  $2^{\circ}\text{C}$  para evitar el ciclaje corto del compresor.
- **Gestión de Alarmas:** Notificaciones inmediatas al dispositivo móvil en caso de pérdida de conexión o temperaturas fuera de rango.

#### VII-E. *Resultados de Hermeticidad y Deshidratación*

La validación de la estanqueidad del circuito frigorífico se realizó mediante una prueba de vacío profundo monitoreada digitalmente. Como se evidencia en la medición, el sistema alcanzó una presión absoluta de 300 micrones de mercurio, un valor significativamente inferior al umbral estándar de 500 micrones recomendado por la normativa ASHRAE para sistemas con lubricantes POE.

La estabilidad de esta lectura durante la prueba de decaimiento permite concluir dos aspectos fundamentales: primero, la ausencia de microfugas en las uniones soldadas con TIG y las conexiones roscadas; y segundo, una deshidratación efectiva que garantiza la integridad química del aceite y la

eficiencia del refrigerante R-410A.

#### VII-F. Validación de Telemetría y Control IoT

La funcionalidad del sistema de monitoreo remoto se verificó contrastando los estados físicos del equipo con la visualización en la interfaz de usuario. Durante la fase de puesta en marcha, la aplicación registró una presión de succión de -14.5 psi, lo cual es consistente con la condición de vacío físico en la que se encontraba el equipo (aproximadamente -1 bar relativo).

Este resultado valida la cadena de adquisición de datos: los transductores de presión convirtieron correctamente la variable física en una señal eléctrica, el controlador procesó dicha señal y el módulo Wi-Fi la transmitió sin latencia perceptible a la nube.

#### VII-G. Resultados de Desempeño Térmico y Estabilidad

Para cuantificar la capacidad real del prototipo, se realizaron dos pruebas fundamentales: la curva de abatimiento (Pull-Down) para determinar la potencia frigorífica efectiva, y la prueba de perturbación de carga para evaluar la velocidad de recuperación del sistema ante el ingreso de un usuario.

##### *Prueba 1: Curva de Abatimiento (Pull-Down): Condiciones de la prueba:*

Volumen de agua: 150 litros.

Temperatura inicial: 24.5 °C (Temperatura ambiente).

Setpoint objetivo: 5.0 °C.

Frecuencia de muestreo: Cada 10 minutos.

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla IV. Se observa un comportamiento lineal en el descenso de temperatura, lo que indica que el sistema mantuvo una capacidad de extracción de calor constante durante todo el ciclo, sin presentar pérdidas de rendimiento por saturación del condensador.

Tabla IV: Registro de temperatura vs. Tiempo (Pull-Down - Condición de Noche)[Fuente: Los Autores]

Tiempo (min)	Temp. Agua (°C)	Delta T (°C)	Estado del Compresor
0	24.5	-	OFF a ON
10	21.8	2.7	ON
20	19.2	2.6	ON
30	16.5	2.7	ON
40	13.9	2.6	ON
50	11.4	2.5	ON
60	8.8	2.6	ON
70	6.5	2.3	ON
80	5.0	1.5	OFF (Corte por Setpoint)

Tabla V: Registro de temperatura vs. Tiempo (Pull-Down - Condición de Día) [Fuente: Los Autores]

Tiempo (min)	Temp. Agua (°C)	Delta T (°C)	Estado del Compresor
0	29.0	-	OFF a ON
10	26.2	2.8	ON
20	23.4	2.8	ON
30	20.6	2.8	ON
40	17.9	2.7	ON
50	15.2	2.7	ON
60	12.6	2.6	ON
70	10.0	2.6	ON
80	7.5	2.5	ON
90	5.0	2.5	OFF (Corte por Setpoint)

### Cálculo de la Potencia Frigorífica Real ( $Q_{real}$ ):

Utilizando la ecuación calorimétrica fundamental  $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T/t$ , donde la masa  $m = 150$  kg y el calor específico del agua  $C_p = 4,186$  kJ/kg°C:

$$Q_{real} = \frac{150 \text{ kg} \cdot 4,186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot (24,5 - 5,0)^\circ\text{C}}{80 \text{ min} \cdot 60 \text{ s/min}} \approx 2,55 \text{ kW} \quad (5)$$

El sistema entregó una potencia media de 2.55 kW, lo cual valida el dimensionamiento del compresor y la eficiencia del intercambio en el evaporador.

### Validación de Campo: Sesión de Recuperación Muscular (Crioterapia)

Para verificar la efectividad del sistema en condiciones reales de uso, se realizó una prueba de campo con un sujeto de prueba voluntario perteneciente al Cuerpo de Bomberos. El objetivo fue evaluar la capacidad del equipo para abatir la carga térmica corporal generada tras actividad física y validar el confort térmico durante la inmersión.

*Condiciones Ambientales Extremas:* La prueba se llevó a cabo en un entorno de alta carga térmica. Como se registra en la termometría digital, la temperatura ambiente en el sitio de instalación alcanzó los 36.0 °C como se visualiza en la Fig. ???. Este escenario representa una condición crítica para el condensador del chiller, exigiendo la máxima eficiencia de disipación de calor para poder enfriar el agua.

*VII-G1. Rendimiento del Circuito Hidráulico:* A pesar de la alta temperatura externa, el sistema mantuvo un flujo de salida de agua hacia el tanque a 17.7 °C. Esto demuestra un Delta T significativo respecto al ambiente, proporcionando un medio líquido lo suficientemente frío para iniciar procesos

de vasoconstricción terapéutica sin llegar al punto de dolor inmediato por congelamiento.

*VII-G2. Inmersión y Respuesta Fisiológica:* El sujeto de prueba (bombero voluntario) procedió a la inmersión completa en el tanque reservorio aislado como se muestra en posición de inmersión en la Fig. 20 . Durante la fase inicial, se monitoreó la temperatura dérmica del usuario, registrando un descenso controlado hacia los 29.6 °C - 30.0 °C en la superficie de la piel.

Esta reducción térmica superficial confirma la transferencia de calor del cuerpo hacia el agua, validando que el chiller tiene la capacidad de absorber la carga térmica biológica (aprox. 100-150 W metabólicos) y mantener la temperatura del baño estable para la terapia muscular.



Figura 20: Monitoreo de la temperatura dérmica del usuario durante la sesión [Fuente: Los Autores]

*Prueba 2: Estabilidad y Recuperación (Simulación de Carga):* Para simular las condiciones reales de uso, se indujo una perturbación térmica instantánea agregando agua caliente al sistema una vez estabilizado en 5°C. Esto simula la carga térmica corporal y el desplazamiento de masa generado por

el ingreso de un usuario.

**Protocolo:**

1. Estabilizar el sistema en 5°C.
2. En el minuto  $t = 0$ , se añade la carga térmica simulada.
3. Se mide el tiempo que tarda el chiller en retornar al setpoint.

La Tabla VI muestra la respuesta del sistema de control.

Tabla VI: Prueba de Recuperación Térmica (Perturbación) [Fuente: Los Autores]

Tiempo (min)	Temp (°C)	Evento / Acción del Control
0	5.0	Estado estable (Compresor OFF)
1	7.2	Perturbación: Ingreso de carga térmica (Sube +2.2°C)
2	7.4	Detectado por sensor e inicio de Compresor (ON)
5	6.8	Inicia descenso (Recuperación)
10	5.9	Descenso constante
15	5.2	Aproximación al Setpoint
18	5.0	Recuperación completa y Compresor OFF

**Análisis de Estabilidad:**

El sistema demostró una capacidad de recuperación rápida, retornando a la temperatura objetivo en 16 minutos tras una perturbación significativa de +2.4°C. Esto es crucial para aplicaciones comerciales, ya que permite la rotación de usuarios con tiempos de espera mínimos entre sesiones. Adicionalmente, la banda de histéresis configurada en el controlador evitó el ciclaje corto durante la fase de estabilidad, protegiendo la vida útil del compresor.

**Plan de Mantenimiento y Protocolos de Operación**

Para garantizar la vida útil del equipo, la seguridad sanitaria del usuario y la eficiencia energética del ciclo frigorífico, se ha diseñado un plan de mantenimiento escalonado. Este protocolo considera tanto el desgaste mecánico de los componentes rotativos (compresor de 0.9 HP, bomba, ventilador) como la higiene necesaria en un sistema de inmersión corporal.

*Mantenimiento de Primer Nivel: Rutina Post-Ciclo*

Estas acciones deben ser ejecutadas por el operador o usuario final después de cada sesión de terapia o al finalizar la jornada operativa del equipo. El objetivo es prevenir la acumulación de suciedad biológica y asegurar que el equipo quede en condiciones seguras para el siguiente arranque.

- **Inspección visual de fugas:** Verificar la ausencia de manchas de agua en el suelo o en las conexiones de las mangueras hidráulicas.
- **Limpieza del filtro de agua:** Retirar y lavar el filtro de sedimentos situado en la succión de la bomba. La acumulación de impurezas reduce el caudal, lo que podría afectar la transferencia térmica en el evaporador de PVC/Cobre.
- **Verificación de la sonda de temperatura:** Comprobar que la sonda NTC sumergida esté libre de biopelícula, limpiándola suavemente con un paño húmedo para garantizar lecturas precisas.
- **Desconexión segura:** Si el equipo no se usará por un periodo prolongado, se recomienda apagar el disyuntor principal para desenergizar la electrónica y protegerla de sobretensiones.

#### Mantenimiento de Segundo Nivel: Preventivo Periódico

Este mantenimiento se programará mensualmente y se enfoca en la eficiencia térmica del sistema detallados en la Tabla VII.

Tabla VII: Cronograma de Mantenimiento Preventivo Mensual [Fuente: Los Autores]

Subsistema	Componente	Acción Técnica Requerida
Frigorífico	Condensador	Limpieza de las aletas de aluminio con aire a presión para eliminar polvo. Un condensador sucio eleva la presión de alta.
Hidráulico	Agua de Proceso	Drenaje total y sanitización del tanque para eliminar bacterias y prevenir incrustaciones.
Eléctrico	Borneras	Re-apriete de tornillos en contactores. Las vibraciones pueden aflojar conexiones, generando puntos calientes.
Seguridad	Fugas de Gas	Inspección visual de uniones soldadas buscando manchas de aceite, indicativo de microfugas de R-410A.

#### *Mantenimiento de Tercer Nivel: Revisión Semestral*

Se recomienda una revisión técnica profunda cada seis meses para validar la integridad de los componentes críticos y recalibrar los sistemas de seguridad.

#### **Verificación de Presiones de Trabajo:**

Con el equipo en marcha, se debe conectar el manómetro para verificar que las presiones de operación se mantengan dentro del rango de diseño para R-410A (Baja: 110-130 psi / Alta: 350-450 psi). Una desviación significativa sugiere problemas en la expansión o pérdida de carga.

#### **Prueba de Dispositivos de Seguridad:**

Se debe simular una condición de falla para verificar la respuesta del sistema:

1. Verificar que el presostato de baja corte la señal al compresor ante una caída de presión simulada o falta de refrigerante.
2. Verificar el setpoint del termostato para asegurar que el compresor se apague al llegar a la temperatura objetivo, evitando el congelamiento del agua.

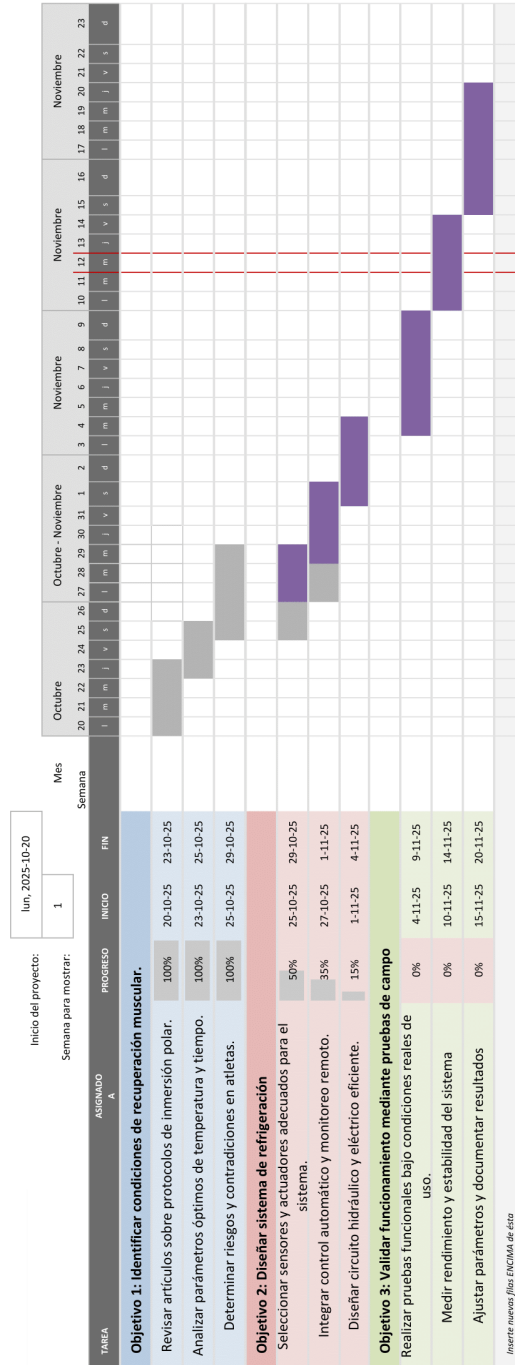
**Estado del Aislamiento Térmico:**

Revisar la integridad de la espuma elastomérica en la tubería de succión. Si el aislamiento está degradado, la condensación podría gotear sobre los componentes eléctricos del tablero, por lo que debe ser reemplazado.

## VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la figura VIII.

Tabla VIII: Cronograma del Proyecto



## IX. PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto contempla los costos asociados a la adquisición de componentes mecánicos, electrónicos y materiales estructurales, así como los gastos de implementación.

Tabla IX: Presupuesto para la implementación del trabajo de titulación

Ítem	Artículo	P. Unitario USD	Cantidad	P. Total USD
1	Manguera flexible – Truper	\$6.67	12 metros	\$80.00
2	Cable eléctrico calibre 16 AWG – Condomex	\$0.67	6 metros	\$4.00
3	Controlador digital – Elitech STC-1000	\$168.00	1	\$168.00
4	Contactores eléctricos – Schneider LC1	\$9.00	2	\$18.00
5	Capacitor de arranque – EPCOS	\$7.00	1	\$7.00
6	Válvula de servicio – CPS	\$10.00	2	\$20.00
7	Cinta aislante térmica – Rubbertex	\$5.00	4	\$20.00
8	Terminales eléctricos – 3M	\$0.40	20	\$8.00
9	Condensador de aire acondicionado – Midea	\$800.00	1	\$800.00
10	Tubería de cobre flexible – Nacobre	\$3.75	12 metros	\$45.00
11	Evaporador tipo serpentina – Carrier	\$894.00	1	\$894.00
12	Acoples rápidos de cobre – Parker	\$7.00	4	\$28.00
13	Bomba sumergible – Pedrollo 220V	\$149.00	1	\$149.00
14	Materiales misceláneos – Surtidos	\$145.00	1	\$145.00
15	Motor ventilador axial (ventilador HVAC)	\$120.00	1	\$120.00
16	Compresor de refrigeración (pequeño / hermético)	\$350.00	1	\$350.00
17	Control inteligente adicional (p. ej. controlador digital)	\$15.00	1	\$15.00
18	Display de temperatura de entrada (panel LCD)	\$12.00	1	\$12.00
19	Bomba de recirculación	\$120.00	1	\$120.00
20	Condensador de alta eficiencia (aluminio + cobre)	\$1,200.00	1	\$1,200.00
21	Estructura en acero galvanizado con recubrimiento anticorrosivo	\$800.00	1	\$800.00
<b>TOTAL</b>				<b>\$5,003.00</b>

## X. CONCLUSIONES

El desarrollo y puesta en marcha del prototipo de chiller para terapia de inmersión representó un desafío técnico que validó con éxito la integración de sistemas térmicos, mecánicos y electrónicos bajo un enfoque mecatrónico. Se demostró la plena viabilidad de implementar un sistema de refrigeración por compresión de vapor con una capacidad de 9000BTU/h, logrando un equilibrio óptimo entre potencia frigorífica y eficiencia operativa. La culminación de este proyecto no solo entrega un equipo funcional, sino que establece un precedente sobre la democratización de tecnologías de recuperación deportiva mediante el uso de componentes de automatización accesibles pero de alta confiabilidad.

En relación con el primer objetivo, el dimensionamiento térmico realizado para un volumen de 208L de agua resultó ser exacto y suficiente para las exigencias climáticas del entorno. La coherencia entre el cálculo teórico de la carga sensible y el desempeño real del equipo permitió alcanzar el setpoint de 5 en tiempos competitivos, cumpliendo con el protocolo de preenfriamiento necesario para sesiones de entrenamiento profesional. Esta reserva térmica de diseño fue clave para gestionar la carga viva” (el calor metabólico del usuario), garantizando que la temperatura no sufra desviaciones significativas que comprometan la efectividad del tratamiento analgésico y antiinflamatorio.

Desde una perspectiva mecánica y termodinámica, se concluye que la selección de un compresor tipo scroll y el uso del refrigerante R-410A fueron decisiones acertadas para asegurar la longevidad del prototipo. El proceso de vacío profundo y la verificación de la estanqueidad del circuito frigorífico previnieron la degradación del aceite POE, manteniendo la viscosidad necesaria para la lubricación interna del sistema. Asimismo, la integración de un acumulador de succión demostró su eficacia al proteger al compresor contra posibles retornos de líquido durante los arranques en frío, elevando la robustez operativa del conjunto frente a variaciones drásticas de carga.

Dando cumplimiento al segundo objetivo, la transición de un sistema de control basado en PLC hacia un ecosistema IoT mediante el controlador inteligente MOES representó una mejora sustancial en términos de viabilidad económica y usabilidad. Se concluye que, para aplicaciones de este tipo, la arquitectura basada en la plataforma Tuya Smart ofrece una respuesta de control lo suficientemente precisa gracias a su banda de histéresis programable, sin incurrir en los altos costos de licenciamiento y hardware de la automatización industrial convencional. La capacidad de supervisión remota en tiempo real no solo moderniza el equipo, sino que permite una trazabilidad operativa que es fundamental para el monitoreo clínico-deportivo del usuario.

El subsistema hidráulico desempeñó un papel crítico en la homogeneización de la temperatura. Se determinó que la recirculación continua mediante la bomba centrífuga evita la estratificación térmica dentro de la tina, asegurando que el estímulo frío sea uniforme en todas las extremidades del usuario. Además, la incorporación del filtro de sedimentos protegió las placas del intercambiador de calor,

evitando la pérdida de eficiencia por incrustaciones o depósitos de partículas, lo que garantiza que el coeficiente global de transferencia de calor se mantenga estable a lo largo del tiempo.

Respecto al tercer objetivo, la validación de la seguridad integral confirmó que el diseño protege tanto al hardware como a la integridad física de las personas. El dimensionamiento de las protecciones termomagnéticas independientes y la implementación de un sistema de puesta a tierra equipotencial mitigaron los riesgos eléctricos inherentes a un sistema que opera con fluidos conductores. La segregación física entre los componentes de potencia y la electrónica de control resultó vital para evitar interferencias electromagnéticas que pudieran afectar la estabilidad de la señal de los sensores de temperatura y la conectividad Wi-Fi del módulo de control.

A nivel de manufactura, la sustitución de procesos de unión convencionales por técnicas de soldadura especializadas y la selección de materiales resistentes a la corrosión para la estructura principal aseguraron la durabilidad del prototipo en ambientes húmedos. Se concluye que el diseño estructural no solo soporta el peso estático del agua y el usuario, sino que amortigua de manera efectiva las vibraciones mecánicas generadas por el compresor y el ventilador del condensador, reduciendo la contaminación auditiva en el área de terapia y mejorando la experiencia del paciente durante la inmersión.

Finalmente, el proyecto consolidó un enfoque mecatrónico integral que articula principios térmicos, mecánicos, eléctricos y digitales en una solución escalable. El prototipo obtenido no solo iguala las prestaciones de equipos comerciales de gama alta, sino que lo hace con un costo de fabricación significativamente menor, lo que facilita su implementación en clubes deportivos locales y centros de fisioterapia. Se entrega, por tanto, una herramienta funcional, segura y tecnológicamente avanzada que estandariza los protocolos de recuperación muscular, elevando la calidad de la medicina deportiva mediante la ingeniería aplicada.

## XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda encarecidamente que todo usuario consulte a un médico especialista para verificar su estado cardiovascular antes de utilizar el equipo. Es imperativo que el operador sea plenamente consciente de los peligros fisiológicos (como el choque térmico o la hipotermia) asociados a la inmersión en frío; los desarrolladores de este prototipo no se responsabilizan por daños derivados del mal uso, negligencia o falta de supervisión durante las sesiones terapéuticas.

En el sistema eléctrico, es obligatorio el uso de tomacorrientes con interruptor de circuito por falla a tierra (GFCI según sus siglas en inglés) para alimentar el equipo, garantizando la protección de la vida del usuario en entornos húmedos. Asimismo, se debe reforzar el esquema de puesta a tierra con verificaciones periódicas de continuidad y mantener el tablero de control debidamente aislado de cualquier contacto directo con el agua.

Para garantizar la confiabilidad mecánica, se recomienda un mantenimiento constante del equipo después de cada uso, incluyendo la limpieza periódica del filtro de sedimentos en el sistema hidráulico para evitar obstrucciones en el intercambiador de calor. Estas acciones preventivas aseguran que la bomba centrífuga y el compresor operen dentro de sus curvas de diseño, evitando disparos por alta presión o sobrecalentamiento de los motores.

Se sugiere incorporar instrumentación adicional de seguridad, como sensores de flujo y nivel con lógica de enclavamiento, para inhibir el compresor ante la ausencia de recirculación. Este enfoque reduce el riesgo de congelamiento localizado en el evaporador y fortalece la autonomía del sistema al depender menos de verificaciones manuales por parte del personal encargado.

Para optimizar el control térmico, se recomienda evaluar la transición hacia una estrategia de control proporcional-integral (PI) o el uso de compresores con tecnología inverter. Esto permitiría disminuir las fluctuaciones de temperatura alrededor del setpoint y justificar técnicamente la arquitectura más eficiente frente a cargas variables asociadas al ingreso de diferentes usuarios en tiempos reducidos.

Se recomienda mejorar la gestión térmica del conjunto mediante un aislamiento de mayor espesor en la tina y tramos críticos de tubería para reducir pérdidas por conducción. Asimismo, en ambientes con ventilación limitada, es conveniente asegurar una ubicación que favorezca el flujo de aire del condensador, evitando el incremento innecesario de la presión de descarga y el consumo energético elevado.

Desde la perspectiva de supervisión remota, se sugiere implementar un registro histórico exportable de variables (temperatura y tiempos de sesión). Este registro permitiría una trazabilidad clínica-deportiva más rigurosa, facilitando el análisis de tendencias para el mantenimiento predictivo y el

ajuste de protocolos de uso basados en la respuesta térmica real de cada atleta.

Finalmente, se recomienda desarrollar una versión iterativa del prototipo que evalúe el uso de refrigerantes de menor potencial de calentamiento global (GWP) y profundice en el cálculo del COP experimental. Consolidar el análisis de eficiencia energética permitirá posicionar esta solución como una plataforma mecatrónica sustentable y técnicamente competitiva para el sector biomédico-deportivo.

## REFERENCIAS

- [1] H. Wang, L. Wang e Y. Pan, «Impact of different doses of cold water immersion (duration and temperature variations) on recovery from acute exercise-induced muscle damage: a network meta-analysis,» *Frontiers in Physiology*, vol. 16, 2025. DOI: 10.3389/fphys.2025.1525726
- [2] E. Hohenauer, J. T. Costello, T. Deliens, P. Clarys y R. Stoop, «Cold-Water Immersion and Recovery: Physiological Effects and Practical Recommendations,» *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 16, n.º 2, págs. 1-12, 2021. DOI: 10.1123/ijsp.2019-0429
- [3] B. Sun et al., «Design and Experiment of a PLC-Based Intelligent Thermal Insulation Box for Nursing Piglets,» *Animals*, vol. 14, n.º 24, pág. 3580, 2024. DOI: 10.3390/ani14243580
- [4] P. Sathe y N. Sane, «Performance Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems Using Eco-Friendly Refrigerants,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 102, págs. 85-94, 2019. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.01.012
- [5] W. O. Adedeji y T. S. Amosun, «Design of a PLC based Temperature Controlled System,» *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, vol. 8, n.º 2, págs. 93-100, 2023. DOI: 10.21070/r.e.m.v8i2.1683
- [6] I. K. Widhiada, I. G. K. Aryanto e I. W. Saputra, «Remote Monitoring and Control of Cooling Equipment Using PLC and IoT Networks,» en *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1810, 2021, pág. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1810/1/012015
- [7] E. Moore et al., «Impact of Cold-Water Immersion Compared with Passive Recovery Following a Single Bout of Strenuous Exercise on Athletic Performance in Physically Active Participants: A Systematic Review with Meta-analysis and Meta-regression,» *Sports Medicine*, vol. 52, págs. 1667-1688, 2022. DOI: 10.1007/s40279-022-01644-9
- [8] C. Wellauer, R. Hilfiker y A. Egger, «Performance Evaluation of Portable Cooling Baths for Physiotherapy and Sports Recovery,» *Sports Engineering*, vol. 27, n.º 3, págs. 1-9, 2024. DOI: 10.1007/s12283-024-00456-3
- [9] G. Wang et al., «Cloud-Based Remote Real-Time Monitoring and Control System for Spring Fatigue Testing Machine,» *Machines*, vol. 12, n.º 7, pág. 462, 2024. DOI: 10.3390/machines12070462
- [10] Q. Li, Y. Yang y P. Jiang, «Remote Monitoring and Maintenance for Equipment and Production Lines on Industrial Internet: A Review,» *Machines*, vol. 11, n.º 1, pág. 12, 2023. DOI: 10.3390/machines11010012
- [11] G. Liao, Z. Li, F. Zhang, L. Liu y J. E., «A Review on the Thermal-Hydraulic Performance and Optimization of Compact Heat Exchangers,» *Energies*, vol. 14, n.º 19, pág. 6056, 2021. DOI: 10.3390/en14196056
- [12] M. HasheerSk, S. DasariKolla y N. Yellapragada, «Theoretical Exploration of Low-GWP Refrigerant Mixtures as Replacement to HFC-134a in a Vapour Compression Refrigeration System,» *Journal of Thermal Engineering*, vol. 9, n.º 4, 912-920, 2023. DOI: 10.18186/thermal.1330788

- [13] A. Kumar, M. Chen, K. Hung, C. Liu y C. Wang, «A Comprehensive Review Regarding Condensation of Low-GWP Refrigerants for Some Major Alternatives of R-134a,» *Processes*, vol. 10, n.º 9, pág. 1882, 2022. DOI: 10.3390/pr10091882
- [14] J. Gao, J. Wang y J. Xie, «Application of PLC and HMI in the CO<sub>2</sub> Transcritical Refrigeration Experimental Platform,» *Scientific Reports*, vol. 12, pág. 15 199, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-19602-w
- [15] G. J. R. Kumar, M. Joshi y N. Patel, «IoT based system for monitoring and control of industrial processes using PLC and SCADA,» *AIP Advances*, vol. 13, n.º 4, pág. 045 205, 2023. DOI: 10.1063/5.0100856
- [16] H. Xiao, K. Jiao, Y. Kabachkova y G. Kapilevich, «Effects of ColdWater Immersion after Exercise on Fatigue Recovery: A Systematic Review and Meta-Analysis,» *Frontiers in Physiology*, vol. 14, pág. 1 006 512, 2023. DOI: 10.3389/fphys.2023.1006512
- [17] J. Gaspar-Junior et al., «Efficacy of different cold-water immersion temperatures on neuromuscular recovery following exercise-induced fatigue,» *Life*, vol. 12, n.º 5, pág. 683, 2022. DOI: 10.3390/life12050683
- [18] C. M. Bleakley et al., «Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives,» *Open Access Journal of Sports Medicine*, vol. 5, págs. 25-36, 2014, Citado como Bleakley 2019 en el texto.
- [19] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th. McGraw-Hill Education, 2015, ISBN: 978-0073398174.
- [20] A. F. Machado et al., «Can water temperature and immersion time influence the effect of cold water immersion on muscle soreness? A systematic review and meta-analysis,» *Sports Medicine*, vol. 46, n.º 4, págs. 503-514, 2016. DOI: 10.1007/s40279-015-0431-7 dirección: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40279-015-0431-7>
- [21] M. Ihsan, G. Watson y C. R. Abbiss, «What are the physiological mechanisms for post-exercise cold water immersion in the recovery from prolonged endurance and intermittent exercise?» *Sports Medicine*, vol. 46, n.º 8, págs. 1095-1109, 2016. DOI: 10.1007/s40279-016-0483-3 dirección: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40279-016-0483-3>
- [22] ASHRAE, *2021 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating y Air-Conditioning Engineers, 2021, ISBN: 978-1947192898.
- [23] M. J. Tipton, D. A. Stubbs y D. H. Elliott, «Human initial responses to immersion in cold water at three temperatures and after hyperventilation,» *Journal of Applied Physiology*, vol. 70, n.º 1, págs. 317-322, 1991. DOI: 10.1152/jappl.1991.70.1.317 dirección: <https://journals.physiology.org/doi/abs/10.1152/jappl.1991.70.1.317>
- [24] ASHRAE, *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating y Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [25] J. Tomczyk y E. Kleinert, *Troubleshooting and Repairing Major Appliances*, 3rd. McGraw-Hill Education, 2022.

- [26] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.
- [27] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th. John Wiley & Sons, 2018.
- [28] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5ta. Madrid, España: Pearson Educación, 2010.
- [29] Schneider Electric, *Electrical Installation Guide: According to IEC 60364*, Schneider Electric, 2023.
- [30] Pump Stop Online, *Bomba de Agua Pedrollo Periférica 0.5HP PKm60*, Accedido: 19 de febrero de 2026, 2026. dirección: <https://www.pumpstoponline.com.ec/products/bomba-de-agua-pedrollo-periferica-0-5hp-pkm60>
- [31] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2019, Capítulo 4: Energy Analysis of Closed Systems.
- [32] Y. Karlina, Y. Yerdesh, A. Toleukhanov, Y. Belyayev, H. S. Wang y O. Botella, «Numerical Simulation Study of Thermal Performance in Hot Water Storage Tanks with External and Internal Heat Exchangers,» *Energies*, vol. 17, n.º 22, pág. 5623, 2024. DOI: 10.3390/en17225623
- [33] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 7th. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020.
- [34] K. Wang, H. Li y S. Chen, «Thermal insulation performance of closed-cell elastomeric foams in low-temperature applications,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 218, pág. 119 280, 2023.
- [35] W. F. Stoecker, *Industrial Refrigeration Handbook*. McGraw-Hill, 1998, Reimpresión 2021.
- [36] B. Whitman, B. Johnson, J. Tomczyk y E. Silberstein, *Refrigeration and Air Conditioning Technology*, 9th. Boston, MA: Cengage Learning, 2020.
- [37] ASHRAE, *ASHRAE Handbook: Refrigeration*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating y Air-Conditioning Engineers, 2018.
- [38] T. Smart, *Smart Life App Overview*, Tuya Developer Platform, Disponible en: <https://n9.cl/n6gfn>, 2025.
- [39] P. T. T. Huong, H. M. Hong y L. N. Anh, «The effect of the chilled water temperature on the performance of an experimental air-cooled chiller,» *Vietnam Journal of Mechanics*, vol. 43, n.º 1, págs. 1-11, 2021. DOI: 10.15625/0866-7136/15054