



**UNIVERSIDAD PRIVADA DEL VALLE
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA BIOMÉDICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN
AUTOCLAVE MARCA PELTON & CRANE MODELO MC COMO
HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA BIOMÉDICA**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR
AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA BIOMÉDICA**

POSTULANTE: DEYBI MALDONADO LÓPEZ

TUTOR: ING. M.SC. EYNAR CALLE VILES

Cochabamba - Bolivia

2025

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres,
Julia Lopez Vera y Raul Maldonado
Melgarejo, por su gran amor y apoyo
incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios por brindarme su guía, fe, fortaleza, esperanza, paciencia y salud en todo momento.

A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y por estar siempre a mi lado en cada paso de mi vida. Su confianza y perseverancia en mí ha sido mi mayor motivación para alcanzar mis metas.

A mis docentes, por compartir su conocimiento a lo largo de mi carrera. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi formación y el éxito de este proyecto.

RESUMEN

Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema de control para una autoclave de la marca Pelton & Crane, modelo MC, con el propósito de convertirla en una herramienta educativa para los estudiantes de Ingeniería Biomédica. La ejecución de este proyecto responde a la necesidad de brindar a los estudiantes un entorno práctico y realista para el aprendizaje de los principios y procesos involucrados en la esterilización de equipos médicos.

Para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo diversas actividades científicas y tecnológicas, incluyendo el diseño y desarrollo de interfaces de control intuitivas, la integración de sensores y actuadores para monitorear y regular los parámetros de esterilización, y la implementación de mecanismos de seguridad para permitir a los estudiantes interactuar con la autoclave de manera segura y efectiva, comprendiendo los conceptos teóricos y prácticos asociados con su funcionamiento y mantenimiento.

Además, se desarrolló material educativo complementario para maximizar el aprendizaje práctico. El proyecto no solo busca mejorar la formación académica de los estudiantes, sino también fomentar la innovación en el campo de la ingeniería biomédica.

En el Capítulo 1, se presentan los fundamentos teóricos relacionados con los procesos de esterilización, el funcionamiento de las autoclaves, la importancia de las plantas de tratamiento asociadas al uso de autoclaves y su importancia en el ámbito hospitalario, así como el marco normativo y técnico aplicable. En el Capítulo 2, se describe el desarrollo del sistema automatizado, abarcando el diseño electrónico, el control lógico, la programación y la integración de componentes. Finalmente, en el Capítulo 3, se exponen las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y un análisis detallado del desempeño del sistema.

Palabras clave: Autoclave educativa, Esterilizador, control automatizado, Herramienta didáctica, PyQt5, Raspberry Pi, SQLite, Ingeniería biomédica.

ABSTRACT

This project focuses on the design and implementation of a control system for a *Pelton & Crane* autoclave, model *MC*, with the purpose of transforming it into an educational tool for Biomedical Engineering students. The development of this project addresses the need to provide students with a practical and realistic environment to learn the principles and processes involved in the sterilization of medical equipment.

To achieve this objective, various scientific and technological activities were carried out, including the design and development of intuitive control interfaces, the integration of sensors and actuators to monitor and regulate sterilization parameters, and the implementation of safety mechanisms to allow students to interact with the autoclave in a safe and effective manner, thereby enhancing their understanding of the theoretical and practical concepts related to its operation and maintenance.

In addition, complementary educational materials were developed to maximize hands-on learning. This project not only aims to improve students' academic training but also to encourage innovation in the field of biomedical engineering.

Chapter 1 presents the theoretical foundations related to sterilization processes, the operation of autoclaves, the importance of treatment plants associated with autoclave use, and their relevance in hospital settings, as well as the applicable technical and regulatory framework. Chapter 2 describes the development of the automated system, including electronic design, logic control, programming, and component integration. Finally, Chapter 3 presents the tests performed, the results obtained, and a detailed analysis of the system's performance.

Keywords: Educational autoclave, Sterilizer, Automated control, Didactic tool, PyQt5, Raspberry Pi, SQLite, Biomedical engineering.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO	
1.1. ESTERILIZACIÓN	1
1.3. ESTERILIZADOR A VAPOR	3
1.3.2. ETAPAS DE UN CICLO DE ESTERILIZACIÓN	5
1.4. VERIFICACIÓN DE ESTERILIZACIÓN	6
1.4.1. INDICADORES QUÍMICOS	6
1.5. CALIDAD DEL AGUA	8
1.6. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA	8
1.6.1. FILTRO DE SEDIMENTOS.....	9
1.6.2. FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	9
1.6.3. ABLANDADOR	9
1.6.4. OSMOSIS INVERSA.....	10
1.7. SISTEMA DE CONTROL.....	10
1.8. RASPBERRY PI	10
1.9. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	12
1.9.1. PYTHON.....	12
1.10. INTERFAZ GRÁFICA	13
1.10.1. QT.....	13
1.11. BASE DE DATOS.....	14
1.11.1. SQLITE.....	15
CAPÍTULO II - INGENIERÍA DEL PROYECTO	
2.1. INTRODUCCIÓN	17
2.2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO ACTUAL	19
2.2.1. EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL EQUIPO.....	20
2.3. MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO DE COMPONENTES.....	28
2.3.1 Cámara de esterilización	28
2.3.2 Resistencias	28
2.3.3 Electroválvulas.....	29
2.3.4 Sensor de temperatura	31
2.3.5 Sensor de presión.....	33

2.3.6	Válvula de alivio	35
2.3.7	Sistema de control	35
2.3.8	Sistema de tuberías	36
2.4.	DISEÑO ESTRUCTURAL	36
2.5.	DISEÑO DE SECUENCIA EDUCATIVA DIDACTICA	38
2.5.1.	Primera Etapa	38
2.5.2.	Segunda Etapa	38
2.5.3.	Tercera etapa	39
2.5.4.	Cuarta etapa	39
2.6.	DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA CON ENFOQUE DEMOSTRATIVO	40
2.7.	DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONTROL	44
2.7.1.	ESQUEMA GENERAL	44
2.8.	DESARROLLO DEL SISTEMA	47
2.8.1.	DESARROLLO DE DISEÑO ESTRUCTURAL	47
2.8.2.	DESARROLLO DE PLACA DE CONTROL Y GENERACIÓN/CAPTACIÓN DE SEÑALES	48
2.8.3.	MECANISMO ACTUADOR	62
2.8.4.	MONTAJE Y DESARROLLO DE TABLERO DE CONTROL	66
2.8.5.	DESARROLLO DE SOFTWARE DE SISTEMA DE CONTROL	68
2.8.6.	DESARROLLO DE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	72
2.8.7.	DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS	82
CAPÍTULO III - PRUEBAS Y RESULTADOS		
3.1.	IMPLEMENTACION DEL EQUIPO	86
3.2.	VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	90
3.3.	FUNCIONAMIENTO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA	91
3.4.	COSTOS UTILIZADOS	96
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES		105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		108
APÉNDICES		111
ANEXOS		139

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE A. GUÍAS DE LABORATORIO DE ACTIVIDADES PRACTICAS	112
APÉNDICE B. EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA N°1	116
APÉNDICE C. EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA N°2	122
APÉNDICE D. MANUAL DE USUARIO	128

ÍNDICE DE ANEXOS

A1. PINOUT RASPBERRY PI 4 B.....	140
A2. PINOUT MODULO MAX31865.....	140
A3. PINOUT MODULO DE RELAY DE ESTADO SOLIDO	141
A4. DATASHEET SENSOR MAX31865.....	142
A5. DATASHEET SENSOR DE PRESION MPX5500.....	143
A6. DATASHEET CONVERTOR A/D MCP3008.....	146
A7. DATASHEET TRIAC BTA16.....	147
A8. TABLA DE PRESION VS TEMPERATURA PARA OBTENER VAPOR SATURADO	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama T-v del agua	2
Figura 1.2. Esterilizador a vapor	3
Figura 1.3. Indicadores químicos	6
Figura 1.4. Raspberry Pi 4 B	12
Figura 1.5. Interfaz gráfica creada con QT	14
Figura 2.1. Diagrama de flujo de trabajo.....	17
Figura 2.2. Estado inicial de autoclave de laboratorio.....	20
Figura 2.3. Cámara de esterilización	21
Figura 2.4. Estado de resistencias eléctricas.....	23
Figura 2.5. Electroválvula	24
Figura 2.6. Válvula de alivio.....	25
Figura 2.7. Estado circuito de tuberías	25
Figura 2.8. Sistema de control	26
Figura 2.9. Diagrama de conexiones eléctricas del sistema inicial	27
Figura 2.10. Limpieza cámara de esterilización.....	28
Figura 2.11. Mantenimiento de resistencias	29
Figura 2.12. Sensor de presión MPX5500	35
Figura 2.13. Rediseño de sistema de tuberías	36
Figura 2.14. Representación gráfica etapa inicial	37
Figura 2.15. Representación gráfica etapa inicial	38
Figura 2.16. Representación gráfica segunda etapa	39
Figura 2.17. Representación gráfica tercera etapa	39
Figura 2.18. Representación gráfica etapa final	40
Figura 2.19. Diagrama esquemático de planta de tratamiento de agua para autoclave	41
Figura 2.20. Planta de tratamiento de agua.....	43
Figura 2.21. Diagrama de bloques.....	45
Figura 2.22. Proceso de rediseño estructural.	47
Figura 2.23. Circuito de placa de control y generación/captación de señales.....	49
Figura 2.24. Circuito de lectura de sensor MPX5500.....	51
Figura 2.25. Registro simultaneo de presión	52

Figura 2.26. Circuito de lectura de sensor PT100.....	54
Figura 2.27. Registro simultaneo de temperatura.....	55
Figura 2.28. Circuito de salidas digitales.....	57
Figura 2.29. Circuito de entradas digitales.....	59
Figura 2.30. Ruteo de PCB.....	60
Figura 2.31. Vista 3D de placa electrónica final.....	61
Figura 2.32. PCB de control y generación/captación de señales.....	61
Figura 2.33. Circuito de control de resistencias eléctricas.....	63
Figura 2.34. Primera placa de prueba.....	63
Figura 2.35. PCB de SSRs de potencia.....	65
Figura 2.36. Conexión del Módulo SSR de 4 Canales.....	65
Figura 2.37. Esquematación de tablero de control.....	66
Figura 2.38. Tablero de control final.....	67
Figura 2.39. Pruebas de funcionamiento manuales.....	68
Figura 2.40. Diagrama de flujo del ciclo de esterilización.....	69
Figura 2.41. Software Qt designer.....	73
Figura 2.42. Secciones de Interfaz gráfica de usuario.....	74
Figura 2.43. Estado inicial de menú principal.....	74
Figura 2.44. Ventana de inicio de sesión.....	75
Figura 2.45. Ventana de registro de nuevo usuario.....	76
Figura 2.46. Ejemplo de ventanas de Primera etapa.....	77
Figura 2.47. Ventana segunda etapa.....	78
Figura 2.48. Ventanas de botones de gráfica y reportes.....	79
Figura 2.49. Ventana de fallas.....	79
Figura 2.50. Ventana tercera etapa.....	80
Figura 2.51. Ventana cuarta etapa.....	81
Figura 2.52. Diagrama relacional de la base de datos.....	83
Figura 3.1. Desarrollo final del proyecto.....	86
Figura 3.2. Gráfica de pruebas iniciales.....	88
Figura 3.3. Remoción de aire por vapor pulsado.....	88
Figura 3.4. Grafica con corrección de presión elevada.....	89
Figura 3.5. Grafica final del ciclo de esterilización.....	90

Figura 3.6. Viraje de indicador químico clase 4.	91
Figura 3.7. Gráfica de barras del porcentaje de aciertos por pregunta.	92
Figura 3.8. Gráfica distribución de puntos totales.	93
Figura 3.9. Participación de estudiantes en la clase con el uso de la herramienta didáctica.	94
Figura 3.10. Graficas de resultados obtenidos posterior al uso de la herramienta didáctica.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla comparativa de electroválvulas.	30
Tabla 2.2. Tabla comparativa termocupla Tipo K, J y PT100	32
Tabla 2.3. Tabla comparativa de PT100 de 2,3 y 4 hilos	33
Tabla 2.4. Tabla comparativa de sensores de presión.	34
Tabla 2.4. Tabla comparativa de instrumentos de medición de presión.....	53
Tabla 2.5. Tabla comparativa de instrumentos de medición de temperatura.	56
Tabla 2.6. Tabla comparativa de consumo de corriente de resistencias	64
Tabla 3.1. Costos utilizados en el proyecto.....	97

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AAMI - Asociación para el Avance de Instrumentación Médica

AC - Corriente Alterna

ADC - Convertidor Analógico-Digital

C.E. - Central de Esterilización

EN 285 - Norma europea para autoclaves grandes

EN 13060 - Norma para autoclaves pequeños

ETO - Óxido de Etileno

GPIO - Entradas/Salidas de Propósito General

GUI - Interfaz Gráfica de Usuario

HMI - Interfaz Hombre-Máquina

HDMI - Interfaz Multimedia de Alta Definición

IPC-2221 - Estándar para diseño de PCB

ISO 11140 - Norma para indicadores de esterilización

MPX5500 - Sensor de presión

PCB - Placa de Circuito Impreso

PLC - Controlador Lógico Programable

PT100 - Sensor de temperatura

PWM - Modulación por Ancho de Pulso

RTD - Detector de Temperatura por Resistencia

SPI - Interfaz Periférica Serial

SQLite - Sistema de base de datos

SSR - Relé de Estado Sólido

ULN2003 - Controlador de cargas

VAC - Voltios de Corriente Alterna

GPD – Galones por día

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería biomédica, la formación práctica y la comprensión profunda de los equipos y procesos médicos desempeñan un papel importante en la preparación de futuros profesionales. En este contexto, el presente proyecto de grado surge como una respuesta a la necesidad de brindar a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Biomédica de la Universidad Privada del Valle, una herramienta educativa innovadora y efectiva.

El entorno de la educación en ingeniería biomédica requiere de experiencias prácticas que permitan a los estudiantes explorar, comprender y aplicar los conceptos teóricos en situaciones reales. Sin embargo, se ha observado que el acceso y la interacción con equipos médicos en el laboratorio de instrumentación biomédica son limitados, lo que afecta la formación integral de los estudiantes.

La autoclave de vapor es un dispositivo crítico que representa un desafío tanto en su operación como en su mantenimiento debido a sus características técnicas y al contexto hospitalario en el que se desempeña. Este proyecto busca abordar estas problemáticas desarrollando un sistema de control digital y una interfaz gráfica de usuario que simule el proceso de funcionamiento de una autoclave de mesa, permitiendo a los estudiantes interactuar con sus componentes y comprender los aspectos prácticos de su operación.

La implementación de este sistema de control no solo busca mejorar la formación de los estudiantes, sino también contribuir al sector de la salud al formar profesionales capaces de abordar de manera efectiva el mantenimiento y la operación de equipos de esterilización en hospitales y centros de salud. Además, la propuesta busca incentivar el interés de los estudiantes por la ingeniería biomédica al ofrecer una experiencia educativa práctica y atractiva.

Este documento presenta una revisión detallada de la problemática, la justificación, los objetivos, la metodología y los alcances del proyecto. Con el desarrollo de este se espera lograr una solución educativa efectiva y de alta calidad que enriquezca la formación de los estudiantes de ingeniería biomédica.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La problemática nace a partir de distintos aspectos. Por un lado, la Universidad Privada del Valle en su sede Cochabamba cuenta con un laboratorio de instrumentación biomédica, el cual presenta distintos equipos algunos funcionales y otros no, estos tienen la finalidad de capacitar de forma práctica a los estudiantes y reforzar sus conocimientos. Sin embargo, este objetivo a menudo no se cumple debido a que el estudiante pocas veces tiene acceso interno a los equipos y simplemente se muestra su funcionamiento externo, así mismo no se cuenta con guías de laboratorio específicas para cada equipo, lo que resulta en una experiencia práctica incompleta cuando los estudiantes interactúan directamente con los equipos. Es el caso de una autoclave a vapor de sobremesa marca Pelton & Crane modelo MC, que se encuentra en el laboratorio. Dicha autoclave presenta un sistema de control analógico y obsoleto que no resulta adecuado para la enseñanza de los estudiantes.

Por otro lado, En los hospitales del país, las autoclaves representan equipos críticos que suelen experimentar múltiples fallos a lo largo de su vida útil. Esto se debe a diversas razones, entre las cuales se encuentran las elevadas presiones y temperaturas a las que están sometidas, así como los problemas derivados de la calidad del agua empleada en el proceso de esterilización. Esta última debe cumplir con ciertos estándares de calidad para garantizar el correcto funcionamiento del equipo, establecidos referencialmente por normativas como la Americana AAMI ST-79 y la Europea EN-285, las cuales definen las características que debe tener una central de esterilización. Sin embargo, en muchas ocasiones, estos estándares son desconocidos, no se aplican correctamente o son ignorados por el personal técnico encargado del mantenimiento del equipo

Como consecuencia, el mantenimiento de las autoclaves se convierte en una preocupación constante para el personal biomédico, quienes reciben frecuentes llamadas de emergencia por parte del personal a cargo del área de esterilización reportando fallos en los equipos. Esta problemática se hace evidente al analizar la hoja de vida de una autoclave a vapor del Hospital Cochabamba, la cual fue obtenida de la base de datos de

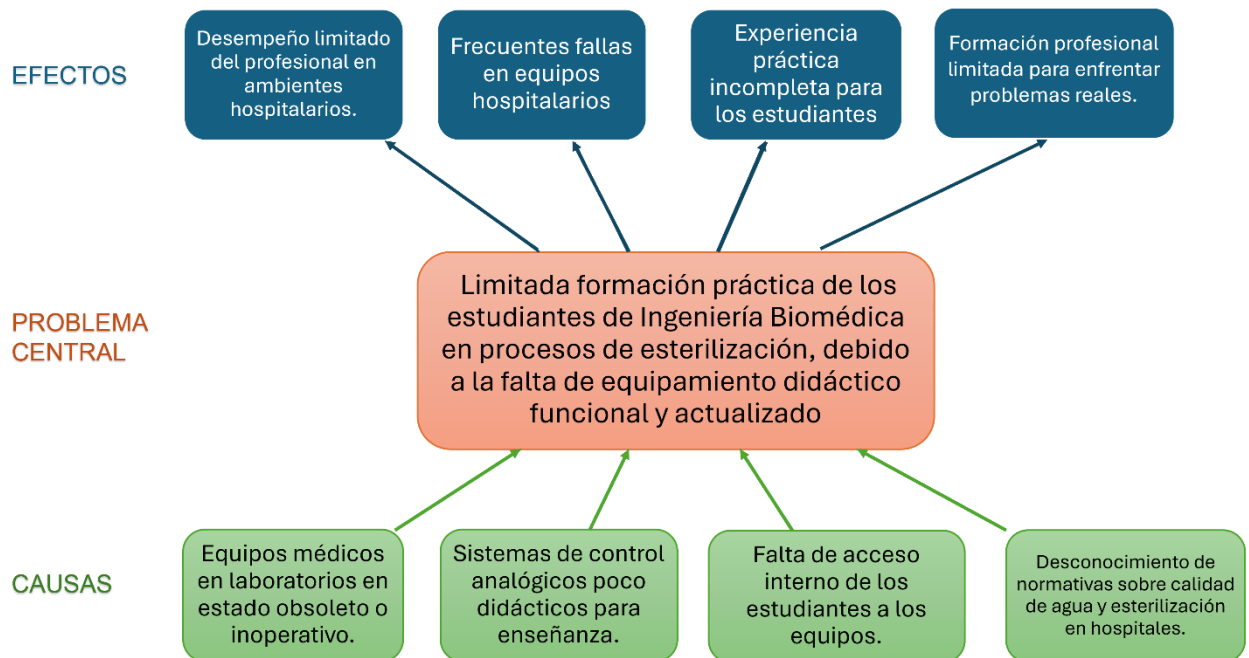
la empresa Ingeniería y Tecnología Médica (ITM). Dicha empresa presta servicios de mantenimiento a diversos hospitales públicos de primer y segundo nivel en el departamento de Cochabamba.

Este documento refleja que en el periodo de marzo de 2021 a junio de 2023 se reportaron un total de 89 intervenciones al equipo, de los cuales 70 han sido llamados de emergencia por alguna falla en el funcionamiento del equipo. Este es un pequeño ejemplo de lo que sucede en muchos hospitales de nuestro país. De ahí la importancia que el estudiante adquiera una buena formación práctica en paralelo a su comprensión teórica, para desenvolverse de la mejor manera en un ambiente laboral, brindando una respuesta práctica y eficaz.

También se realizó una serie de preguntas a los estudiantes de la carrera de ingeniería biomédica que cursaron la materia de instrumentación médica II, acerca de la autoclave a vapor y el sistema de tratamiento de agua, con el objetivo principal de evaluar sus conocimientos prácticos y conocer el grado de satisfacción que se tiene con la experiencia práctica que reciben con el equipo de esterilización del laboratorio de instrumentación biomédica en el transcurso de su carrera.

Los resultados indican que el 64 % de los estudiantes no supo responder a las cuestionantes de índole práctico y 73% no están conformes con la experiencia práctica que se brinda en la universidad con los equipos médicos. Por ello surge la necesidad de contar con herramientas didácticas prácticas que apoyen a la educación integral de los estudiantes.

Figura: Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia, 2025.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta el árbol de problemas de la figura mostrada anteriormente, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué impacto tiene el diseño e implementación de un sistema de control destinado a una autoclave educativa sobre el aprendizaje práctico de los estudiantes de Ingeniería Biomédica?

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Este proyecto se plantea con el objetivo de brindar a los estudiantes una experiencia de aprendizaje práctico que facilite la comprensión, retención e integración efectiva de los conceptos teóricos relacionados con el proceso de esterilización. De este modo, se busca fortalecer sus competencias y prepararlos de manera más adecuada para su futura inserción en el ámbito laboral.

Para la universidad, esta iniciativa representa una valiosa herramienta de enseñanza práctica, útil tanto como recurso de apoyo docente como para el aprendizaje autónomo del estudiante, al permitir la articulación entre teoría y práctica.

Asimismo, se espera fomentar el interés por la Ingeniería Biomédica al evidenciar la aplicabilidad real de los conocimientos adquiridos en el aula, promoviendo una formación más significativa y contextualizada

JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El sistema de control fue diseñado para incorporar las mismas funcionalidades y capacidades que los equipos modernos de esterilización, enfocándose en la modernización tecnológica y su aplicabilidad en el entorno educativo. Se integró tecnologías adecuadas, como una computadora de placa única Raspberry Pi, la cual permitió un manejo eficiente de bases de datos, conexión a una interfaz hombre-máquina (HMI) y un procesamiento avanzado de datos en tiempo real.

Desde el punto de vista técnico, el sistema contó con un control digital flexible y con sensores suficientes que garantizaron una monitorización precisa de parámetros críticos, como presión y temperatura. Esto permitió ejecutar ciclos de esterilización personalizados, diseñados para fomentar el aprendizaje práctico de los estudiantes.

Además, el sistema facilitó la recopilación de datos y el seguimiento detallado del ciclo de esterilización, lo que ha proporcionado retroalimentación valiosa tanto para los estudiantes como para los docentes.

Finalmente, se han implementado mecanismos de protección a través de software y dispositivos eléctricos y mecánicos, los cuales han asegurado un entorno educativo seguro y controlado, minimizando los riesgos durante la operación del equipo.

JUSTIFICACIÓN SOCIAL

Con el desarrollo de esta herramienta educativa los estudiantes de la carrera de ingeniería biomédica podrán estar en constante capacitación práctica, mejorando tanto su rendimiento como la calidad de su educación. Docentes contarán con una herramienta de apoyo que les sirva como guía enseñanza y evaluación a los estudiantes. Esto se logrará a través de una interfaz didáctica desarrollada en etapas progresivas que presentará el sistema.

La implementación de esta herramienta educativa, además de fortalecer la formación académica, tendrá un impacto indirecto en la mejora de la calidad de la atención médica. Al dotar a los estudiantes con habilidades específicas en el mantenimiento de equipos de esterilización, se contribuye a la formación de profesionales biomédicos competentes.

Este proyecto pretende tener un gran impacto social en el ámbito educativo al ser un proyecto innovador para la enseñanza, específicamente orientado a la carrera de ingeniería biomédica, que a lo largo de los años ha ido tomando mayor protagonismo en la sociedad y en el sector de la salud. Por ende, la implementación de esta herramienta no solo beneficia a los estudiantes, sino que también contribuye al avance continuo de la carrera.

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

La estructura y la reutilización de ciertos componentes del equipo de esterilización actual presente en el laboratorio de instrumentación Biomédica, como la cámara de esterilización, resistencias, electroválvulas y otros elementos estructurales, proporciona una base sólida para la implementación del nuevo sistema de control. Esto reduce significativamente los costos asociados con la adquisición de nuevos equipos y contribuye a una disminución de los costos de producción y ahorro de recursos.

El proyecto pretende posicionar a la institución como líder en la formación práctica en el campo de la Ingeniería Biomédica, ofreciendo una formación actualizada y relevante, que seguramente atraerá a nuevos estudiantes que buscan la combinación perfecta de teoría y aplicación práctica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de control destinado a una autoclave educativa, como herramienta didáctica para mejorar la formación práctica de los estudiantes de la carrera de ingeniería biomédica en la Universidad Privada del Valle.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio y organización de la información para el cumplimiento de normativas de funcionamiento y seguridad del equipo.
- Evaluar y revisar el funcionamiento del equipo y sus componentes, para su respectivo mantenimiento o remplazo.
- Identificar necesidades eléctricas y de componentes para la correcta dimensión del sistema de control.
- Diseñar un sistema básico de tratamiento de agua con la finalidad de complementar el objetivo educativo del proyecto.

- Desarrollar el circuito de monitorización de sensores y circuito de potencia para la manipulación de actuadores.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario didáctica que esquematice y monitorice el proceso de funcionamiento tanto de la autoclave como del sistema de tratamiento.
- Ensamblar el sistema para realizar pruebas de funcionamiento que garanticen la seguridad y el correcto desempeño del equipo.
- Validar el proceso de esterilización siguiendo un protocolo con indicadores químicos.
- Validar el objetivo educativo del proyecto evaluando una cantidad específica de estudiantes.

METODOLOGÍA

TIPO DE ESTUDIO

El estudio se caracterizó por su enfoque descriptivo, explicativo y exploratorio. Estos enfoques permitieron abordar de manera integral la investigación y desarrollo del proyecto. A continuación, se detallan los mismos:

ESTUDIO DESCRIPTIVO

Se aplicó con el propósito de detallar las propiedades y características de los componentes y del software empleado. Se realizó una revisión bibliográfica para establecer una base sólida y comprensiva que aseguró una correcta implementación práctica.

ESTUDIO EXPLICATIVO

Con el fin de profundizar en el objeto de estudio y conocer la relación causa – efecto, lo que permitió validar la funcionalidad y eficacia del esterilizador propuesto.

ESTUDIO EXPLORATORIO

Se llevó a cabo considerando la escasa exploración existente en torno al objetivo central del proyecto, que fue el desarrollo de una autoclave con fines educativos.

MÉTODO

Se emplearon métodos teóricos como el analítico y el deductivo, así como métodos empíricos de observación y medición. A continuación, se describen:

MÉTODO ANALÍTICO

Este método se utilizó como camino para alcanzar resultados mediante la descomposición del fenómeno en sus partes o elementos constitutivos, con el objetivo de observar causas, naturaleza y efectos. Permitted explicar, hacer analogías, comprender mejor el comportamiento del objeto de estudio y establecer nuevas teorías.

MÉTODO DEDUCTIVO

Se aplicó este método, dado que la obtención de conocimiento partió de lo general a lo particular, al estudiar datos generales de equipos de esterilización y adecuarlos para realizar un sistema educativo práctico.

MÉTODOS DE OBSERVACIÓN Y MEDICIÓN

Estos métodos fueron fundamentales para la recolección de información y la determinación de parámetros operativos del sistema. Por otro lado, la observación directa y la medición de variables fueron clave para validar el funcionamiento del equipo y evaluar su impacto en un entorno educativo.

TÉCNICAS

Se emplearon técnicas de recolección de datos, principalmente mediante revisión documental de normativas, tesis y trabajos relacionados al tema.

Debido a la necesidad de implementación y validación del objetivo del proyecto, se desarrollaron encuestas como fuente primaria de información y evaluación de resultados.

POBLACIÓN

La población evaluada estuvo conformada por estudiantes de la carrera de Ingeniería Biomédica que cursaron la materia de Instrumentación Médica II. Se seleccionaron 30 estudiantes que recibieron formación educativa tradicional y 10 estudiantes que utilizaron la herramienta didáctica desarrollada.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO

1.1. ESTERILIZACIÓN

Es el proceso mediante el cual se alcanza la muerte de todas las formas de vida microbianas, incluyendo bacterias y sus formas esporuladas altamente resistentes, hongos y sus esporos, y virus. Se entiende por muerte, la pérdida irreversible de la capacidad reproductiva del microorganismo (Vignoli, 2006).

El material que va a ser sometido a esterilización debe estar limpio, seco y empaquetado en función del método de esterilización a seguir por sus características.

El proceso de esterilización no debe producir cambios ni en la apariencia, ni en el funcionamiento de los materiales, aun después de ciclos repetidos. (Silvestre et al., 2000)

1.2. TERMODINÁMICA DEL VAPOR SATURADO

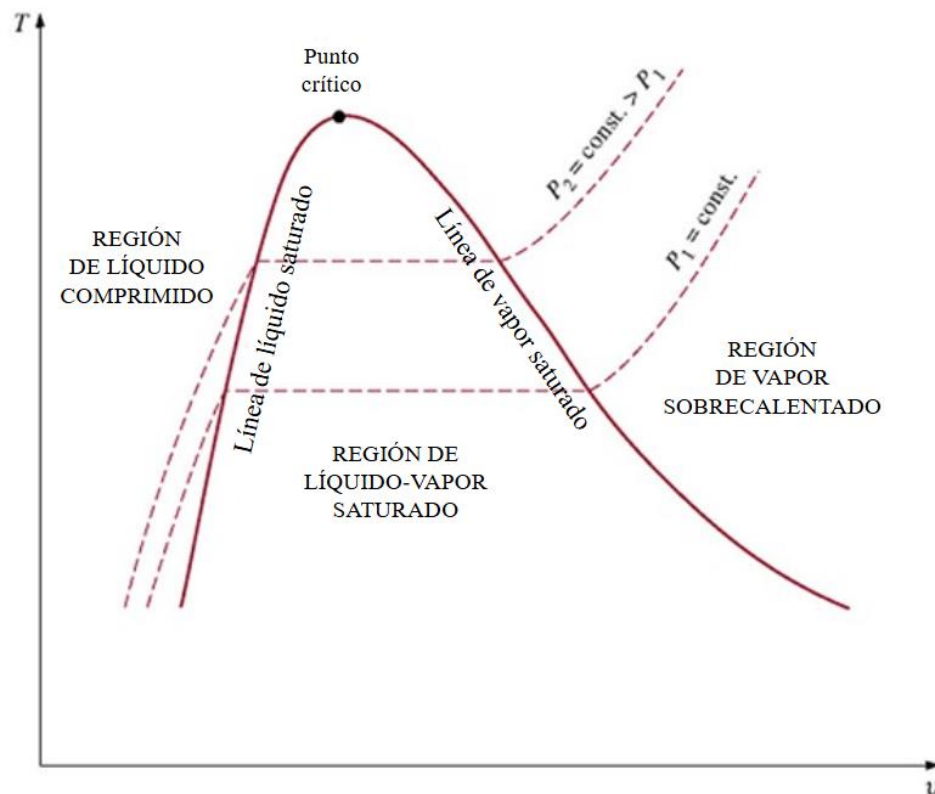
La termodinámica del vapor saturado es fundamental para comprender el funcionamiento de los sistemas de esterilización que emplean vapor de agua, como las autoclaves. El vapor saturado es una condición de equilibrio en la cual el agua coexiste simultáneamente en estado líquido y gaseoso, a una temperatura y presión específicas. Esta condición es esencial porque el vapor saturado posee una alta concentración de energía térmica, necesaria para destruir microorganismos y esporas mediante la coagulación de proteínas y otros mecanismos físicos (Çengel & Boles, 2015).

Cuando el agua líquida se calienta a presión constante, alcanza una temperatura denominada temperatura de saturación, en la cual comienza su transformación en vapor sin que la temperatura aumente, a pesar del suministro continuo de calor. Durante esta fase, el calor añadido se utiliza para romper las fuerzas intermoleculares del líquido, proceso conocido como vaporización. La cantidad de energía requerida para este cambio de fase se denomina entalpía de vaporización (Moran, Shapiro, Boettner, & Bailey, 2018). El proceso puede describirse en las siguientes etapas:

- **Líquido subenfriado:** el agua está a una temperatura inferior a la de saturación.
- **Líquido saturado:** el agua ha alcanzado su punto de ebullición, estando lista para comenzar la evaporación.
- **Mezcla líquido-vapor:** coexistencia de agua líquida y vapor, manteniendo presión y temperatura constantes.
- **Vapor saturado seco:** todo el líquido se ha transformado en vapor, en el límite antes de pasar a vapor sobrecalentado.

Esta relación entre presión y temperatura de saturación puede visualizarse mediante un diagrama temperatura-volumen específico (T-v), que representa gráficamente los cambios de fase del agua, como se muestra en la Figura 1.1.

Figura 1.1. Diagrama T-v del agua.



Fuente: Çengel & Boles (2015).

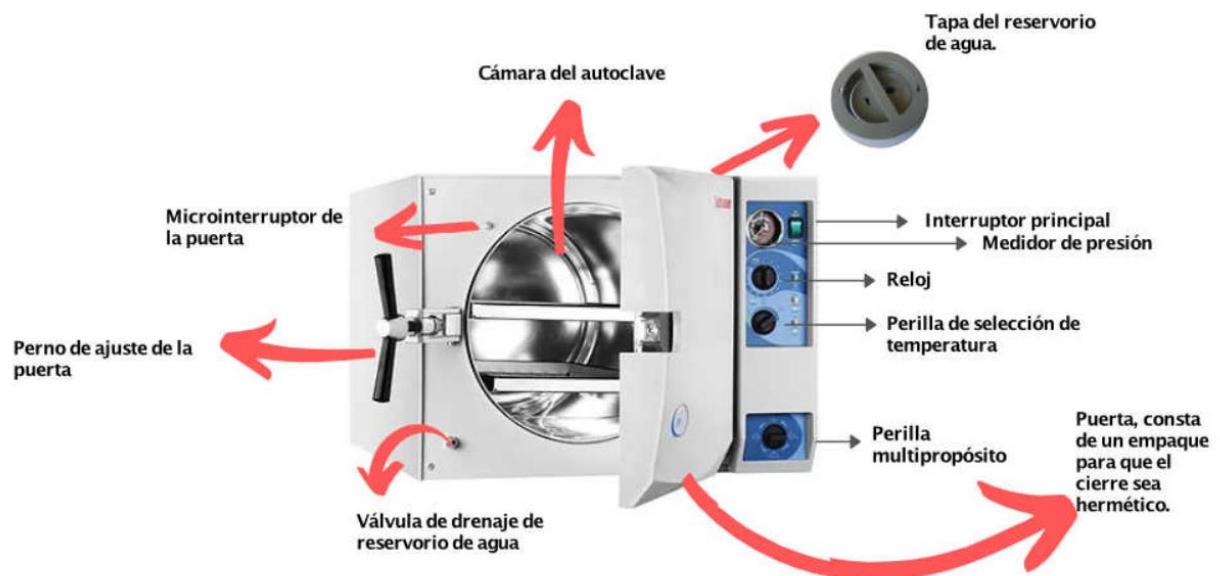
Existe una relación única entre la presión y la temperatura de saturación para cada sustancia. En el caso del agua, a una presión de 101.3 kPa (1 atmósfera), la temperatura

de saturación es de 100 °C (Çengel & Boles, 2015). En un esterilizador, se controlan estas variables para garantizar que el vapor saturado alcance condiciones óptimas de esterilización, normalmente superiores a 121 °C y 2 atmósferas de presión, logrando la eliminación efectiva de agentes patógenos en tiempos controlados.

1.3. ESTERILIZADOR A VAPOR

Un Esterilizador, está compuesto por un contenedor o recipiente de material de acero inoxidable al cromo, níquel, molibdeno en AISI 316L, con cierre hermético de la puerta. La elaboración de este recipiente debe ser diseñado para que soporte altas presiones y temperaturas que será desarrollada en su interior de la cámara. Como se muestra en la Figura 1.2. Las presiones altas permitirán que el agua alcance temperaturas mayores a los 100 °C. La acción conjunta de la temperatura con el vapor producirá la coagulación de las proteínas de los microorganismos, que se encontraran dentro de la cámara, siendo destruidos o eliminados completamente y no permitiendo su reproducción.

Figura 1.2. Esterilizador a vapor



Fuente: Muñoz (2023).

Los esterilizadores de vapor para centros hospitalarios funcionan permitiendo en su entrada el ingreso de vapor, bloqueando su salida para alcanzar una presión interna de

cámara a 108 Kpa, alcanzando una temperatura de 121°C, durante un tiempo de esterilización de 15 a 20 minutos.

Los esterilizadores de vapor modernos permiten alcanzar presiones internas en la cámara a 210 Kpa, alcanzando una temperatura de 134 °C, durante un tiempo aproximado de 3 a 7 minutos esterilizando material instrumental, textil, etc. (Robilotti & Couso, 2011)

1.3.1. CLASIFICACION DE AUTOCLAVES

En la esterilización por vapor saturado, especialmente en equipos de pequeña escala, la norma europea EN 13060 clasifica a las autoclaves en tres grandes clases: Clase B, Clase S y Clase N. Esta clasificación se basa en la capacidad de eliminar el aire de la cámara de esterilización y en la aptitud para procesar diferentes tipos de cargas (European Committee for Standardization [CEN], 2004).

Clase B: Las autoclaves de Clase B son los más versátiles y avanzados. Utilizan bombas de vacío que realizan ciclos de vacío fraccionado antes de la inyección del vapor, lo que asegura la completa eliminación del aire en la cámara y dentro de los instrumentos. Este tipo de autoclaves permite esterilizar todo tipo de cargas: instrumentos sólidos, porosos, textiles, objetos con cavidades internas y materiales empaquetados. Son los preferidos en hospitales, clínicas odontológicas y laboratorios que manejan cargas complejas y de alta exigencia de esterilización.

Clase S: Las autoclaves de Clase S están diseñadas para cargas específicas indicadas por el fabricante. Su capacidad de esterilización se sitúa entre los equipos de Clase B y los de Clase N. Algunos modelos incluyen un sistema de vacío limitado, lo que les permite esterilizar instrumentos sólidos empaquetados o materiales con características sencillas de penetración de vapor. No obstante, no garantizan una esterilización segura de instrumentos de lumen largo, cargas muy porosas o textiles voluminosos.

Clase N: Las autoclaves de Clase N son los más básicos. El proceso de esterilización depende de la expulsión del aire por gravedad, sin la ayuda de bombas de vacío. Solo son aptos para esterilizar instrumentos sólidos y sin empaquetar. No son recomendables para cargas porosas, empaquetadas o con geometrías internas complejas. Son comúnmente utilizados en consultorios pequeños, donde se procesan instrumentos simples y donde no se requiere esterilizar materiales de alta complejidad.

1.3.2. ETAPAS DE UN CICLO DE ESTERILIZACIÓN

Las etapas básicas que debe contar un esterilizador a vapor son las siguientes:

- **Inicio:** En esta etapa se va a cerrar la puerta herméticamente para que la cámara quede completamente sellada y no presenten fugas de vapor a la intemperie.
- **Calentamiento:** En esta etapa ingresara vapor a la cámara de esterilización, introduciéndose cada vez más en los paquetes a esterilizar hasta que el vapor los cubra íntegramente, lográndose estabilizar la presión con la temperatura dentro de la cámara.
- **Esterilización:** Se va a mantener constante la temperatura y presión en la cámara durante el tiempo de esterilización que haya sido programado.
- **Despresurización:** En esta etapa el vapor de la cámara va a ser extraído, disminuyendo la presión de la cámara.
- **Secado:** Manteniendo caliente la cámara para permitir el secado del material, evitando que se contamine durante su transporte y/o almacenamiento del material.
- **Igualación:** En esta etapa va a ingresar aire a la cámara, a través de un filtro de aire Hepa, para que la presión de la cámara sea igual a la presión atmosférica.

- **Fin del Proceso o ciclo:** Se desbloquean las puertas para que puedan ser abiertas, de esta manera poder retirar el material. (Serra,2013).

1.4. VERIFICACIÓN DE ESTERILIZACIÓN

1.4.1. INDICADORES QUÍMICOS

Consiste en tiras de papel con una sustancia que cambia de color al ser expuesto a la temperatura correspondiente, como se muestra en la Figura 1.3. La ventaja de este método es la rapidez con que se sabe el resultado, ya que es inmediato. La gran desventaja es que dice poco sobre el tiempo de exposición, por lo que no asegura un procedimiento correcto. Estos controles deben utilizarse en todos los ciclos de esterilización. (Vignoli, 2006)

Figura 1.3. Indicadores químicos



Fuente: Alvarez (2018)

De acuerdo con la norma ISO 11140, los indicadores químicos se clasifican en 6 categorías:

Clase 1: Llamados termocromos e indicadores colorimétricos, se trata de compuestos principalmente a base de sales de diferentes metales. Son una tira que cambia de color al alcanzar una temperatura determinada. Tenemos el indicador químico externo documenta cada paquete el correcto funcionamiento del esterilizador (Cinta Testigo).

Tenemos el indicador químico interno documenta que el agente esterilizante ha penetrado en el interior del paquete (Capacoila 2019).

Clase 2: Para indicadores con pruebas específicas se utiliza el test de Bowie Dick. (Capacoila 2019).

Clase 3: De un solo parámetro. Diseñados como para responder a un solo parámetro: como temperatura o radiación. Ejemplo: tubos de vidrio que se funden y cambian de color (Capacoila 2019)

Clase 4: De multiparámetros. Diseñados para responder a dos o más parámetros críticos de esterilización. Vapor Saturado: T°, tiempo, vapor saturado. ETO: T°, tiempo, humedad relativa, concentración del gas ETO. Calor seco: tiempo y T°. Ejemplo: tiras impresas cambian de color. (Capacoila 2019)

Clase 5: Integradores. Diseñados para reaccionar a todos los parámetros críticos de la esterilización. Son tintas que cambian de color secuencialmente de acuerdo con el tiempo de exposición concentración de gas, humedad y temperatura. El pellet se funde y migra por la tira absorbente. También los hay de tinta que vira por color. El punto final está en la posición del químico. Autoriza a certificar un ciclo y lo valida a excepción de implantes que debe ser certificado por control Biológico (Capacoila 2019)

Clase 6: Emuladores. Diseñados para responder a todos los parámetros críticos cuando ha transcurrido más del 95 % del ciclo. Su indicación es para ciclos especiales (textil, contenedores, caucho, priones, etc.) (Capacoila 2019)

1.5. CALIDAD DEL AGUA

El agua que llega a través de las tuberías de alimentación del hospital arrastra una carga significativa de minerales presentes en la superficie terrestre, cuya concentración puede variar según la ubicación y la profundidad de los pozos. Es esencial realizar un estudio detallado del agua en la entrada de la Central de Esterilización (C.E.), incluso si ya existe un sistema de tratamiento principal en el hospital. Este análisis permite determinar la idoneidad del agua para la preparación de instrumentales, asegurándose de que no supere los límites máximos de contaminantes permitidos para la producción de vapor. (Lenntech, 2024).

La calidad del agua, crucial en la producción de vapor para procesos hospitalarios, implica controlar la cantidad máxima de minerales presentes. Superar estos límites compromete la calidad del vapor (≤ 3 S/cm) y la eficacia de la esterilización, pudiendo resultar en contaminaciones. Las normas AAMI ST79 (estadounidense) y EN285 (europea) regulan la calidad del agua en las centrales de esterilización, siendo la EN285 más estricta y, por tanto, la más recomendable para asegurar un proceso adecuado de lavado y producción de vapor. (Lenntech, 2024).

1.6. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Una planta de tratamiento de agua para calderas es esencial en la industria para garantizar un suministro de agua de alta calidad en sistemas de calderas. Estas plantas aplican diversos procesos de purificación para eliminar impurezas y prevenir problemas relacionados con la acumulación de incrustaciones y corrosión en las calderas (Interempresas, 2021).

Es fundamental que los sistemas de tratamiento de agua implementados en hospitales cumplan con normativas como la AAMI ST-79 o la EN-285, que establecen los estándares de calidad necesarios para garantizar la seguridad del paciente durante los procesos de limpieza, descontaminación y esterilización de equipos médicos. (Lenntech, 2024).

1.6.1. FILTRO DE SEDIMENTOS

El prefiltro de cartucho sedimentador retiene partículas y sedimentos presentes en el agua, tales como arena, limo y óxido. Su función es evitar daños a la membrana de ósmosis inversa y prolongar su vida útil. Los filtros de sedimentos son la primera línea de defensa en un sistema de tratamiento de agua, capturando partículas que podrían causar abrasión o bloqueo en etapas posteriores del tratamiento. Estos filtros también contribuyen a la reducción de la turbidez del agua, mejorando la eficiencia de los procesos de purificación posteriores y garantizando un funcionamiento óptimo del sistema de ósmosis inversa (Filtrashop, 2020).

1.6.2. FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

El filtro de carbón activado elimina el cloro presente en el agua, junto con otros compuestos orgánicos volátiles y cloraminas, que pueden afectar el sabor y el olor del agua. Esto es crucial para proteger la membrana de ósmosis inversa, ya que el cloro puede dañarla y reducir su eficiencia. Los filtros de carbón activado también son efectivos en la eliminación de pesticidas, herbicidas y otros contaminantes orgánicos. Al mejorar la calidad del agua de entrada, estos filtros ayudan a prolongar la vida útil de las membranas de ósmosis inversa y mejorar el rendimiento general del sistema de tratamiento de agua (Loor y Robles, 2024).

1.6.3. ABLANDADOR

Los suavizadores de agua reducen la dureza del agua al reemplazar los minerales de dureza “iones de calcio y magnesio” y los intercambia por sodio que no es un ion incrustante. En casos de muy alta dureza del agua (más de 25 granos por galón), la suavización por intercambio iónico por sal es la mejor solución práctica.

El agua dura crea capas de sarro en tuberías, llaves de baños, regaderas de agua; incrusta calentadores de agua y causan pérdida de energía (calor) o un mayor consumo de electricidad. El agua muy dura (> 10 gpg) también puede causar una obstrucción prematura en las membranas de ósmosis inversa. (Filtrashop, 2022).

1.6.4. OSMOSIS INVERSA

El proceso de ósmosis inversa elimina sales, metales pesados y otros contaminantes del agua. Este método de purificación utiliza una membrana semipermeable que permite el paso de moléculas de agua, pero bloquea la mayoría de los solutos disueltos, incluyendo iones y moléculas más grandes. La membrana de ósmosis inversa tiene una alta eficiencia de purificación y es fundamental en la planta de tratamiento. Este proceso no solo mejora la calidad del agua, sino que también es efectivo para eliminar microorganismos patógenos, lo que es crucial para aplicaciones industriales y potables. La ósmosis inversa se emplea ampliamente en la desalinización de agua de mar y en la producción de agua ultrapura para industrias farmacéuticas y electrónicas (Interempresas, 2021).

1.7. SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control se conceptualiza como una entidad que recibe variables de entrada o acciones externas y responde con variables de salida. Las variables de entrada se clasifican en variables de control, que pueden ser manipuladas, y perturbaciones, sobre las cuales no se puede ejercer ningún control. La función principal de un sistema de control es asegurar la estabilidad frente a perturbaciones y errores en los modelos, así como optimizar su eficiencia según criterios preestablecidos, minimizando los errores a niveles aceptables, según lo descrito por Giraldo y Tabares (1997, citado por Carrillo y Caiza, 2015)

1.8. RASPBERRY PI

Raspberry Pi OS es un sistema operativo gratuito basado en Debian, optimizado para el hardware Raspberry Pi y es el sistema operativo recomendado para uso normal en una Raspberry Pi. El sistema operativo viene con más de 35,000 paquetes: software precompilado incluido en un formato agradable para una fácil instalación en su Raspberry Pi.

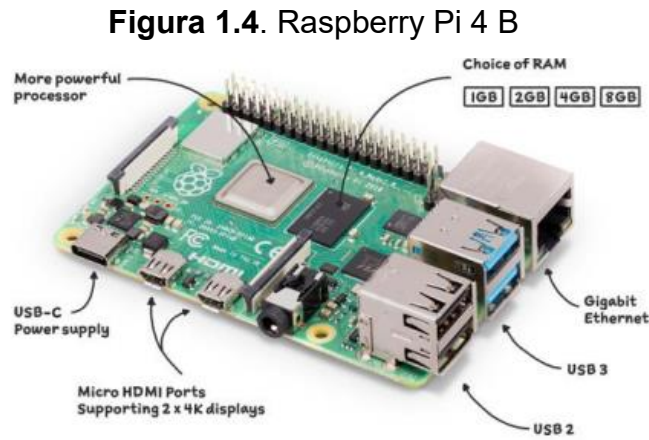
El sistema operativo Raspberry Pi se encuentra en desarrollo activo, con énfasis en mejorar la estabilidad y el rendimiento de tantos paquetes Debian como sea posible en Raspberry.

Pi Raspberry Pi 4 Model B es el último producto de la popular gama Raspberry Pi de ordenadores. Ofrece aumentos revolucionarios en la velocidad del procesador, multimedia rendimiento, memoria y conectividad en comparación con la generación anterior Raspberry Pi 3 Model B+, manteniendo la compatibilidad con versiones anteriores y similares el consumo de energía. Para el usuario final, Raspberry Pi 4 Modelo B proporciona escritorio rendimiento comparable a los sistemas de PC x86 de nivel de entrada, como se muestra en la Figura 1.4.

Especificaciones:

- SoC Broadcom BCM2711, Cortex-A72 de cuatro núcleos (ARM v8) de 64 bits a 1,5 GHz
- SDRAM LPDDR4-3200 de 1 GB, 2 GB, 4 GB u 8 GB (según el modelo)
- 2,4 GHz y 5,0 GHz IEEE 802.11ac inalámbrico, Bluetooth 5.0, BLE 14
- Gigabit Ethernet
- 2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0.
- Encabezado GPIO de 40 pines estándar de Raspberry Pi (totalmente compatible con versiones anteriores de placas anteriores)
- 2 × puertos micro-HDMI (compatible con hasta 4kp60)
- Puerto de pantalla MIPI DSI de 2 carriles
- Puerto de cámara MIPI CSI de 2 carriles
- Puerto de audio estéreo y video compuesto de 4 polos
- H.265 (descodificación 4kp60), H264 (descodificación 1080p60, codificación 1080p30)
- OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0
- Ranura para tarjeta micro-SD para cargar sistema operativo y almacenamiento de datos
- 5V CC mediante conector USB-C (mínimo 3^{a*})
- 5 V CC a través del cabezal GPIO (mínimo 3 A*)
- Alimentación a través de Ethernet (PoE) habilitada (requiere PoE HAT separado)
- Temperatura de funcionamiento: 0 – 50 grados C ambiente

- Se puede utilizar una fuente de alimentación de 2,5 A de buena calidad si los periféricos USB descendentes consumen menos de 500 mA en total.



Fuente: Raspberry Pi Foundation, (2021).

1.9. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Un lenguaje de programación es una herramienta formal que permite a los programadores crear programas para controlar el comportamiento físico y lógico de una computadora. Consiste en un conjunto de instrucciones que definen y gestionan algoritmos, acciones y datos necesarios para el procesamiento adecuado. La programación implica traducir algoritmos a este lenguaje para que el procesador pueda ejecutarlos, utilizando compiladores o intérpretes para convertir el código fuente en lenguaje máquina. (Monterde, 2017)

1.9.1. PYTHON

Este lenguaje de programación está presente en muchas aplicaciones y sistemas operativos, como iOS, Windows, Linux, Mac o Android, debido a que tiene una curva de aprendizaje moderada, con un Código legible. Es un Código versátil multiplataforma que se destaca por su 15 código limpio. Su éxito principalmente se debe a que es un código abierto, que permite su uso desde cualquier rincón del mundo. Es importante destacar que en este software se trata con la versión Python 3.8 (32 bits), actualmente la más reciente. (Elibrodepython 2021)

Tiene como características:

- Lenguaje multiplataforma. Se puede usar en distintos sistemas operativos
- Ideal para trabajar con volúmenes de datos muy grandes, favorece el procesamiento, siendo también el lenguaje utilizado por las empresas de Big Data. Algunas de sus ventajas son: Sencillez y presteza, selecto, legible, fácil de aprender, organizado, portable y con un gran número de usuarios que participan activamente en su Desarrollo.
- Imperativo. Describen el estado del programa y permiten la modificación mediante instrucciones de Código. Se describe paso a paso un conjunto de instrucciones.
- Funcional. Variación del programa mediante la mutación y el cambio de variables. Así, se opera con datos de entrada y salida.
- Orientado a Objetos. Los objetos manipulan a otros, para ofrecer una salida específica. También permite juntar librerías.
- Dinámico. Una variable puede tomar distintos valores de diferentes tipos en distintos momentos.

1.10. INTERFAZ GRÁFICA

Una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) es un conjunto de elementos gráficos que facilitan la comunicación con un sistema o estructura (Gonzales, 2004). La GUI es la parte visible, audible o táctil de una computadora y su software, permitiendo al usuario interactuar y dirigir el sistema. Comprende dos componentes: entrada y salida. La entrada se refiere a cómo el usuario comunica sus necesidades a la computadora, utilizando dispositivos como teclado, ratón, *trackball*, pantallas táctiles y voz. La salida es cómo la computadora devuelve la información al usuario, siendo la pantalla el método más común, aunque también se usan voz y sonido (Carrión, 2014).

1.10.1. QT

QT es un *framework* multiplataforma orientado a objetos de uso extendido que sirve para desarrollar aplicaciones que poseen una interfaz gráfica de usuario, como se muestra en la Figura 1.5. Es un software libre de código abierto, de modo que tanto la comunidad

como desarrolladores de grandes empresas como Nokia aportan a su continuo desarrollo. Utiliza C++ como lenguaje de programación, aunque se puede usar con otros lenguajes de programación empleando bindings. Otro de sus grandes potenciales es el hecho de ser multiplataforma. Pueden desarrollarse aplicaciones para Windows, Linux, Mac OS, Android, etc. Son muchas las empresas que desarrollan aplicaciones basadas en Qt, como por ejemplo Panasonic, Samsung, Volvo, AMD, Mercedes-Benz, etc. (Fernandez, 2022)

Figura 1.5. Interfaz gráfica creada con QT



Fuente: Building A Good Looking GUI For WIN CE 7 Using QT 4.8, (2017).

Qt tiene todo lo que necesita para diseñar, desarrollar, probar, implementar y mantener su software durante todo el ciclo de vida del producto de su dispositivo integrado. Los fabricantes de sistemas integrados en más de 70 industrias están construyendo sus productos con Qt. Los requisitos de seguridad funcional son cada vez más relevantes en una serie de mercados dispares. Con Qt puede desarrollar sistemas integrados modernos que son seguros desde el punto de vista funcional y fáciles de usar. (Fernandez, 2022)

1.11. BASE DE DATOS

Una base de datos es un conjunto organizado de datos almacenados externamente para satisfacer las necesidades informativas de una organización, centralizando y minimizando la duplicidad de datos para permitir su uso compartido (Marqués, 2011). Consiste en archivos relacionados, cada uno compuesto por registros y campos que

almacenan atributos de entidades reales, similares a tablas con renglones y columnas (Cruz, 2011). Además, incluye metadatos que facilitan la independencia lógica-física, simplificando la gestión y el acceso a los datos (Marqués, 2011).

1.11.1. SQLITE

SQLite es un sistema gestor de bases de datos relacionales que está liberado bajo una licencia de dominio público, esto quiere decir que no tiene derechos de autor y que no existe ninguna restricción a la hora de utilizarlo. Entre sus características más destacadas están: no requiere una arquitectura cliente/servidor ni configuración adicional, almacena cada base de datos en un solo archivo, es multiplataforma, se integra fácilmente con aplicaciones, tiene un tamaño reducido, soporta transacciones ACID, y es compatible con la mayoría de las características del estándar SQL92. (Sánchez, 2023)

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DEL

PROYECTO

CAPÍTULO II - INGENIERÍA DEL PROYECTO

2.1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de ingeniería se centró en el desarrollo y optimización de un sistema de esterilización, con el propósito de transformar una autoclave de la marca Pelton & Crane, modelo MC, en una herramienta educativa para estudiantes de Ingeniería Biomédica.

Para lograr este objetivo, se diseñó un flujo de trabajo estructurado que abarca diversos aspectos técnicos y didácticos para su correcta implementación. En la Figura 2.1, se presenta un diagrama que ilustra el flujo de trabajo del proyecto, permitiendo visualizar la secuencia lógica de actividades y su interconexión para el desarrollo del sistema.

Figura 2.1. Diagrama de flujo de trabajo



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- **Análisis y Diagnóstico del Equipo Actual:** Se llevó a cabo un estudio a detalle del estado actual del equipo de esterilización, identificando sus fortalezas y debilidades en términos de diseño, funcionalidad y seguridad.

- **Mantenimiento y Reemplazo de Componentes:** Se definió estrategias para la restauración del equipo, reemplazo de partes obsoletas o defectuosas y mejoras necesarias para optimizar su rendimiento.
- **Diseño Estructural:** Se ha establecido un nuevo diseño para la estructura del equipo, considerando aspectos para optimizar la operatividad y brindar una estructura más didáctica y de fácil acceso.
- **Diseño de Secuencia Educativa Didáctica:** Se desarrollo una estrategia educativa para facilitar la enseñanza y aprendizaje de los estudiantes, incorporando procedimientos didácticos e interactivos adecuados.
- **Diseño de planta de tratamiento de agua con enfoque demostrativo:** Se presenta el diseño de una planta de tratamiento de agua con enfoque demostrativo, destinada a suministrar agua de calidad para la autoclave educativa, detallando cada etapa del proceso desde el almacenamiento hasta la ósmosis inversa.
- **Diseño del Nuevo Sistema de Control:** Se sentó las bases para el desarrollo del sistema de control basado en tecnologías modernas.
- **Desarrollo del Sistema:** Se ejecutan todas las actividades planificadas para materializar el nuevo sistema de control, incluyendo su programación, integración y optimización para asegurar su correcto funcionamiento y aplicación en un entorno educativo.

A continuación, se detallan los aspectos de análisis y desarrollo, cada uno de los cuales contribuyeron a la ejecución integral del proyecto:

2.2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO ACTUAL

En la carrera de Ingeniería Biomédica tradicionalmente, el aprendizaje se ha centrado en la teoría y la observación pasiva de los equipos médicos, sin embargo, se reconoce la importancia de la práctica directa para la comprensión profunda de los conceptos y la adquisición de habilidades técnicas.

En las instituciones de salud, las autoclaves son herramientas vitales para la esterilización de los diversos materiales e instrumental médico así también los sistemas de tratamiento de agua que van de la mano, sin embargo, el acceso y la oportunidad para que los estudiantes manipulen y comprendan el funcionamiento de estos dispositivos en un entorno controlado y educativo son limitados. Esta brecha entre la teoría y la práctica puede obstaculizar el desarrollo completo de las habilidades de los estudiantes y su preparación para enfrentar desafíos reales en el campo de la ingeniería biomédica.

Por lo tanto, el objetivo de este sistema es brindar a los estudiantes una herramienta educativa didáctica de una autoclave a vapor, acompañado de un sistema básico de tratamiento de agua con el fin de proporcionar una experiencia práctica en el manejo de este equipo.

Al brindarles la oportunidad de interactuar directamente con la autoclave y el sistema de tratamiento, los estudiantes podrán comprender mejor los principios de funcionamiento, los componentes internos y los aspectos de seguridad asociados con este dispositivo, para ello se diseñó un sistema de enseñanza progresiva dividida en cuatro etapas. Esto no solo enriquecerá su formación académica, sino que también los preparará de manera más efectiva para enfrentar los desafíos del mundo real en el ámbito biomédico.

Para comenzar con el diseño e implementación de un sistema de control para la autoclave educativa, es esencial realizar un diagnóstico detallado del equipo existente. La marca de autoclave Pelton & Crane modelo MC, actualmente presente en el laboratorio de instrumentación biomédica, se caracteriza por tener un sistema de control analógico

obsoleto que también ha sufrido modificaciones técnicas y estructurales a lo largo de su vida útil, como se observa en la Figura 2.2. Este equipo fue la base sobre la cual se implementó el nuevo sistema de control digital.

Figura 2.2. Estado inicial de autoclave de laboratorio.



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

2.2.1. EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL EQUIPO

Se llevó a cabo una inspección completa del equipo para evaluar su estado, identificar posibles fallas y determinar qué componentes son reutilizables. Este proceso permitió detectar partes que aún se encontraban en condiciones óptimas, aquellas que requerían mantenimiento, y los elementos que necesitaban ser reemplazados por completo. Los resultados obtenidos de esta evaluación sirvieron como base para planificar las modificaciones necesarias y garantizar que la autoclave funcione en óptimas condiciones. Los resultados fueron los siguientes:

- **Cámara de esterilización:** Se mantuvo de fábrica y tiene los siguientes aspectos técnicos:
 - Código de referencia: 22755
 - Dimensiones: La cámara mide 76,2 cm (30") de profundidad x 40,6 cm (16") de diámetro.
 - Capacidad de volumen: 75 litros.
 - Presión máxima de trabajo: 35 PSI (2.41 Bar)
 - Temperatura máxima de trabajo: 455 °F (235 °C)
 - Año de fabricación: 1992

Durante la evaluación visual y funcional, se constató que la cámara de esterilización se encontraba en buenas condiciones, sin corrosión o daños estructurales que puedan comprometer su funcionamiento o seguridad, como se muestra en la Figura 2.3, Sin embargo, se detectó la presencia de suciedad y acumulación de residuos tanto en el exterior como en el interior, probablemente debido al tiempo prolongado que el equipo estuvo en desuso. Por lo tanto, requiere una limpieza externa e interna.

Figura 2.3. Cámara de esterilización



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

- **Resistencias eléctricas:** El equipo cuenta con un total de 7 resistencias eléctricas, distribuidas en dos ubicaciones alrededor de la cámara: 4 resistencias en la parte superior y 3 en la parte inferior.

Las resistencias superiores tienen los siguientes valores medidos:

- 109.8 ohms
- 110 ohms
- 109.7 ohms
- 110.7 ohms

Estos valores se encuentran dentro del rango de validez del fabricante, que es de 103.5 a 126.5 ohms. Conectadas en paralelo tienen una resistencia equivalente a 27.54 ohms, lo que resulta por ley de ohm en un consumo de corriente de 7.988 A

Las resistencias inferiores tienen los siguientes valores medidos:

- 57.1 ohms
- 56.3 ohms
- 56.1 ohms

Estos valores también se encuentran dentro del rango de validez del fabricante, que es de 52.2 a 63.8 ohms. Conectadas en paralelo tienen una resistencia equivalente de 19.04 ohms, lo que resulta en un consumo de corriente de 11.55 A. Llegando a un consumo total de 19.538 A.

Todas las resistencias funcionan adecuadamente y se encuentran dentro de los rangos especificados por el fabricante, pero presentan un leve grado de corrosión externa y plancha de soporte de resistencias en malas condiciones, como se observa en la Figura 2.4.

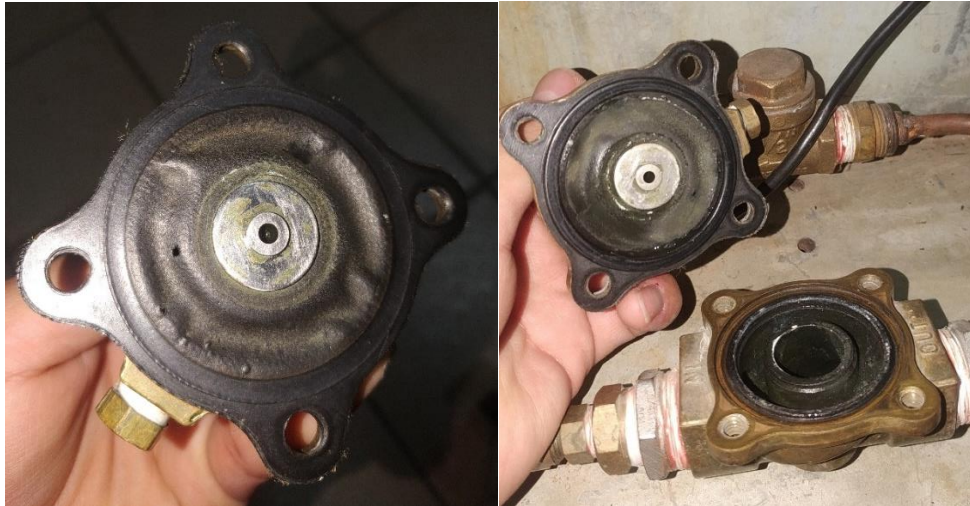
Figura 2.4. Estado de resistencias eléctricas



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

- **Electroválvulas:** El equipo posee dos electroválvulas de la marca ASCO de dos vías y con alimentación de 110 VAC, una destinada al ingreso de agua desmineralizada de tipo pistón con puertos de $\frac{1}{4}$ de pulgada y otra para la salida de vapor o despresurización de la cámara de tipo membrana con puertos $\frac{1}{2}$ de pulgada. Sin embargo, ambas electroválvulas no están operativas debido a la presencia de fugas y perforaciones internas, como se muestra en la Figura 2.5. y deben ser reemplazados.

Figura 2.5. Electroválvula



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

- **Sensor de temperatura:** Termocupla tipo k en malas condiciones y debe ser reemplazado.
- **Sensor de presión:** No presenta y debe ser implementado.
- **Válvula de alivio:** Mantiene el componente de fabrica como se puede observar en la Figura 2.6. y tiene las siguientes características técnicas:
 - Marca: CONBRACO
 - Código de referencia: 10-322
 - Rosca $\frac{3}{4}$ de pulgada
 - Presión de disparo fija: 34 PSI o 2.3442 Bar

Durante las pruebas realizadas aplicando presión, se evidenció un funcionamiento inadecuado de la válvula de seguridad. Esta liberó presión a niveles superiores a 10 KPa, muy por debajo del umbral preestablecido de fábrica, que es de 34 PSI (234 KPa). Esta discrepancia demostró que el componente no cumplía con su función de

manera correcta, lo cual compromete la seguridad y eficiencia del equipo. Por lo cual, debe ser reemplazado.

Figura 2.6. Válvula de alivio



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

- **Sistema de tuberías:** El equipo no conserva su estructura original debido a modificaciones realizadas a lo largo de su vida útil, lo que ha generado un diseño desordenado con adaptaciones improvisadas, haciéndolo inadecuado para la enseñanza educativa, como se muestra en la Figura 2.7.

Figura 2.7. Estado circuito de tuberías



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

- **Sistema de control:** Ha sufrido adaptaciones a lo largo del tiempo y se basaba en un PLC Logo 230 RC de la marca Siemens. Este PLC funcionaba principalmente como un circuito de relés para la activación y desactivación de los distintos actuadores presentes en el sistema.

Este modelo de PLC no contaba con entradas analógicas, lo que representaba una limitación significativa en cuanto a la capacidad de censado y monitoreo en tiempo real de variables fundamentales del proceso, como la presión y la temperatura. Debido a esta limitación, el control del ciclo de esterilización no era gestionado por el PLC, sino que se realizaba mediante un controlador térmico externo marca Altronic, modelo CMO 04, que operaba bajo una lógica de control on/off basado en las lecturas de una termocupla tipo K. Este termostato controlaba el encendido de las resistencias calefactoras a través de 2 contactores y regulaba la temperatura activando o desactivando la salida de control en función de si se alcanzaba o no el valor de temperatura objetivo establecido manualmente. Esto se puede observar en la Figura 2.8.

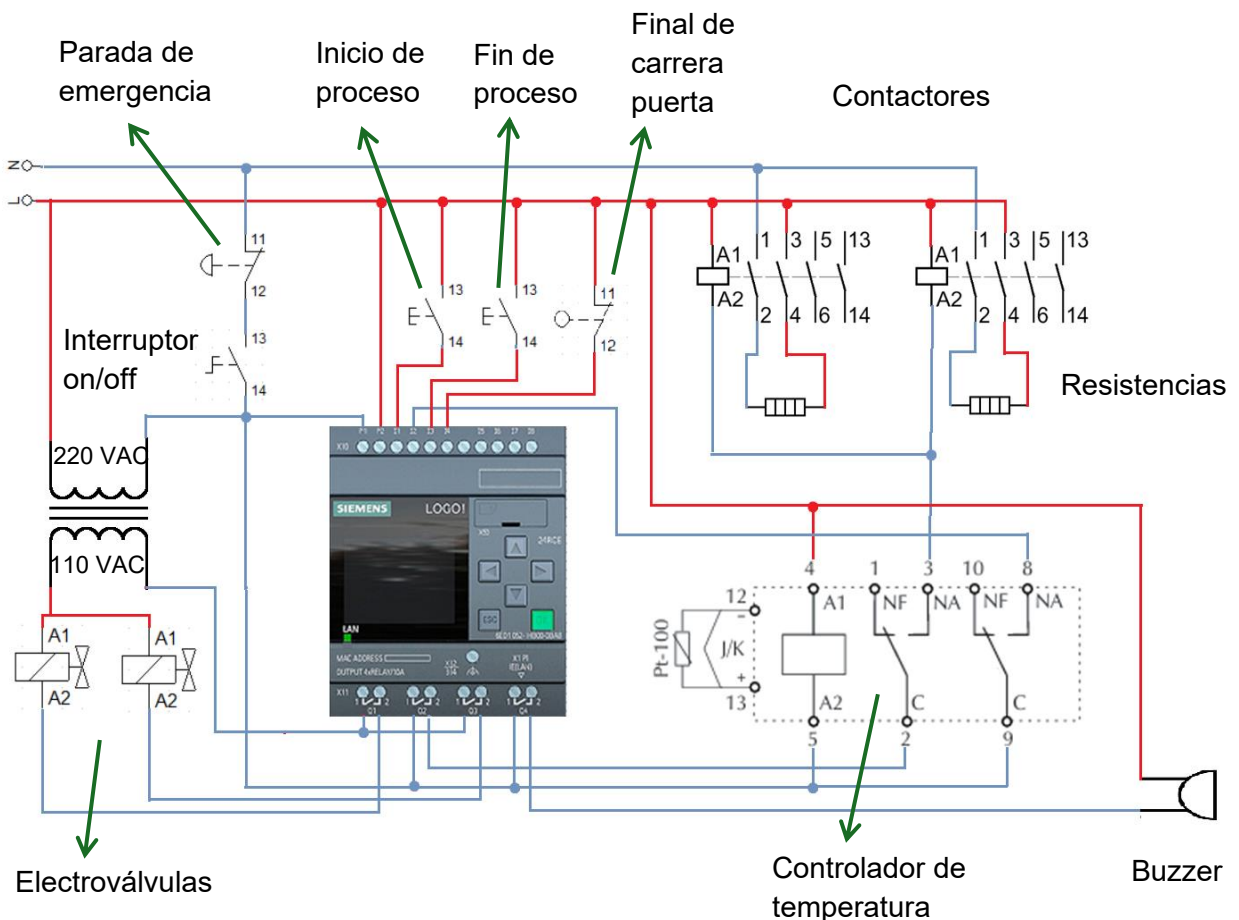
Figura 2.8. Sistema de control



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Este tipo de control netamente térmico resultaba ser poco preciso y el hecho de que la presión no fuera medida ni controlada desde el PLC representaba una limitación significativa, pues en un proceso de esterilización por vapor, el control de este parámetro es fundamental para garantizar la efectividad de la esterilización y la seguridad del equipo. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de conexiones eléctricas del sistema, el cual detalla la interconexión entre el PLC, los actuadores, el controlador térmico y botoneras.

Figura 2.9. Diagrama de conexiones eléctricas del sistema inicial



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.3. MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO DE COMPONENTES

De acuerdo con la evaluación previa del estado del equipo, se llevó a cabo el mantenimiento y la sustitución de los componentes que presentaban daños o un mal rendimiento. Este proceso se realizó con el objetivo de restaurar la funcionalidad óptima del equipo y asegurar su operatividad a largo plazo.

2.3.1 Cámara de esterilización

Se llevó a cabo un procedimiento de limpieza externa e interna, como se muestra en la Figura 2.10.

Figura 2.10. Limpieza cámara de esterilización



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

2.3.2 Resistencias

Se procedió con el mantenimiento externo de las mismas. Este mantenimiento incluyó el desmontaje, pulido y aplicación de pasta térmica para mejorar la transferencia de calor de las resistencias eléctricas a la cámara. Así como también el reemplazo de plancha de soporte. Este proceso se puede observar en la Figura 2.11.

Figura 2.11. Mantenimiento de resistencias



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

2.3.3 Electroválvulas


Se procedió con el reemplazo de las electroválvulas tras una evaluación detallada de especificaciones. Es esencial que las nuevas electroválvulas sean capaces de operar con vapor saturado a altas temperaturas y presiones.

Para la selección, se consideró que la autoclave operara con ciclos de esterilización a 121°C y una presión manométrica de 1.3 bares, por lo que las electroválvulas deben soportar valores superiores a estos.

Inicialmente, se analizaron 3 modelos de electroválvulas: la Electroválvula 20740 de la marca THERMOVAL, la Electroválvula 14681 de la marca THERMOVAL y la electroválvula US-15B de la marca BENCI. Tal como se presenta en la Tabla 2.1, las 3 cumplían con las especificaciones técnicas mínimas necesarias. En un primer momento, se había optado por la electroválvula de THERMOVAL, debido a que sus características físicas

ofrecían mayor facilidad de mantenimiento y acceso interno, aspectos considerados relevantes para fines didácticos y de aprendizaje práctico para los estudiantes.

Tabla 2.1. Tabla comparativa de electroválvulas.

Imagen			
Modelo	Electrovalvula 20740 - THERMOVAL	Electrovalvula 14681 - THERMOVAL	Electrovalvula US-15B - BENCI
Rosca	Hembra 1/2"	1/2"	1/2"
Diámetro de flujo de apertura	Ø 16,0 mm	Ø 17 mm	DN15
Voltaje de alimentación	220/240 V, 50/60 Hz, 20 W	AC 220V	AC 220V
Medio de trabajo	Fluidos de silicona, aire, lubricantes a base de Di-Éster, GLP, gas natural, oxígeno frío, H ₂ O, vapor, etanol	Vapor, aire, agua	Vapor, gas GLP-natural, agua, aire, aceite
Tipo	2 vías normalmente cerrado (abre cuando está energizado)	Normalmente cerrado (apagado)	Normalmente cerrado
Presión de trabajo	Mín. 0 / Máx. 150 PSI	Mín. 0 / Máx. 190 PSI	0,5 a 16 kg/cm ²
Tipo de funcionamiento	Diafragma	pistón	pistón
Temperatura de trabajo / ambiente	-25°C a +150°C	-25°C a +180°C	50°C a 180°C
Material del cuerpo	Latón (ASTM B16)	Latón	Acero inoxidable 304
Sello	Elastómero de Fluorocarbono (Viton)	PTFE	No especificado
Precio	800 Bs.	1900 Bs.	2600 Bs

Fuente: Elaboración propia, 2025.

No obstante, durante las pruebas funcionales, se identificó que una de las electroválvulas de diafragma (THERMOVAL), destinada al ingreso de agua a la cámara de esterilización, no funcionaba adecuadamente bajo condiciones de contrapresión generada por el vapor. Se determinó que estas válvulas están diseñadas para operar con una presión mínima de operación (típicamente entre 0.3 a 1 bar) que mantiene el diafragma en su posición de cierre. Cuando la presión en la línea de descarga (aguas abajo) supera en más del 10-15% la presión de entrada provoca el retorno no deseado de vapor hacia el reservorio de agua, comprometiendo la seguridad y estabilidad del sistema.

Ante esta situación, se procedió al reemplazo de dicha válvula por el modelo 14681 de THERMOVAL, la misma al ser de tipo pistón soporta una presión diferencial de alrededor de 80 PSI (5.51 bar), el cual resolvió el problema de retorno de vapor y permitió un funcionamiento adecuado en esa parte del proceso. Finalmente, se mantuvo una válvula de tipo diafragma (THERMOVAL) únicamente para la etapa de despresurización, donde sí demostró un comportamiento estable y compatible con los requerimientos operativos.

Esta decisión permitió aprovechar las ventajas específicas de cada electroválvula en diferentes puntos del sistema, asegurando tanto el correcto funcionamiento del proceso como la posibilidad de intervención didáctica en mantenimiento y análisis técnico.

2.3.4 Sensor de temperatura

Para el reemplazo del sensor de temperatura se realizó una comparativa técnica de la termocupla presente en el equipo y un sensor PT100, el cual es el más comúnmente usado en este tipo de equipos. La Tabla 2.2 muestra la comparativa de tecnologías.

Tabla 2.2. Tabla comparativa termocupla Tipo K, J y PT100

Característica	Termocupla Tipo K	Termocupla Tipo J	PT100
Principio de Funcionamiento	Efecto Seebeck (voltaje)	Efecto Seebeck (voltaje)	Cambio de resistencia (RTD)
Rango de Temperatura	-200°C a +1260°C	-40°C a +750°C	-200°C a +850°C
Precisión	Moderada ($\pm 1.5^\circ\text{C}$)	Moderada ($\pm 1.1^\circ\text{C}$)	Alta ($\pm 0.1^\circ\text{C}$)
Estabilidad	Menos estable en ambientes oxidantes a altas temperaturas	Menos estable debido a la oxidación del hierro a temperaturas elevadas	Muy estable
Salida de Señal	Milivoltios	Milivoltios	Resistencia

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Las termocuplas funcionan basándose en el efecto Seebeck, que genera un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura entre dos puntos unidos por dos metales diferentes. Este voltaje se encuentra en el orden de los milivoltios (mV), que es pequeña y puede ser susceptible a interferencias eléctricas, mientras que los sensores PT100 son RTD (Resistores Dependientes de la Temperatura) que funcionan basándose en el cambio de resistencia eléctrica con la temperatura y produce una señal resistiva (en ohms), que es más robusta y menos susceptible a interferencias.

Bajo estos aspectos se seleccionó el sensor de temperatura pt100 que nos brinda mayor estabilidad y precisión.

Estos sensores en el mercado vienen en presentaciones de 2, 3 o 4 hilos y su diferencia radica en cómo se conectan y compensan las resistencias del cableado, lo que afecta la precisión de la medición de temperatura. La resistencia del sensor es de 100 ohmios a

0°C, y la resistencia del cable se puede sumar e introducir errores en la medición si los cables son largos o si tienen una resistencia significativa, entonces a mayor cantidad de hilos se ofrece una mayor compensación de resistencia del cableado.

Para entender y seleccionar el tipo de sensor adecuado para esta aplicación, se realizó una comparativa de las tecnologías de PT100, como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Tabla comparativa de PT100 de 2,3 y 4 hilos

Característica	PT100 de 2 Hilos	PT100 de 3 Hilos	PT100 de 4 Hilos
Número de Hilos	2	3	4
Precisión	Baja	Media	Alta
Compensación	No	Parcial	Completa
Complejidad	Baja	Media	Alta
Costo	Bajo	Medio	Alto
Aplicaciones	Baja precisión, cables cortos	Media precisión, cables largos	Alta precisión, aplicaciones críticas

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se seleccionó el sensor de temperatura PT100 de 3 hilos por ser el más adecuado para el equipo. Esta elección se debe a que no se requiere un grado de precisión exagerado y la distancia de los cables no supera los 3 metros. Por lo tanto, la compensación de la resistencia del cableado será equilibrada, minimizando los errores y asegurando un funcionamiento óptimo.

2.3.5 Sensor de presión

Para obtener una señal analógica de la presión interna de la cámara en autoclaves de sobremesa sin sistema de vacío, se consideraron distintos tipos de sensores, tales como transmisores industriales con salida de corriente 4–20 mA, sensores de alta precisión

como la serie PX2 de Honeywell, y sensores piezoresistivos de la serie MPX. Como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Tabla comparativa de sensores de presión.

Característica	Series MPX	Transmisor presión 4–20 mA (genérico)	Honeywell PX2 Series
Tipo de sensor	Piezoresistivo	Transmisor piezoresistivo con acondicionador	Transmisor piezoresistivo industrial
Rango de medición	0 hasta 1 MPa. (según versión)	0 – 10 bar (0 – 1000 kPa)	0 – 1 MPa (0 – 145 psi)
Tipo de presión	Manométrica	Manométrica	Manométrica
Salida analógica	0.2 – 4.7 V (rango típico)	4 – 20 mA	0.5 – 4.5 V o 4–20 mA
Precisión	±1.5 % F.S.	±1.0 % F.S.	±0.25 % F.S.
Alimentación	5 VDC	12 – 24 VDC	5 VDC o 9–30 VDC (según versión)
Compatibilidad con microcontrolador	Alta (voltaje directo)	Media (requiere resistor y conversión)	Media
Costo	Medio	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tras una evaluación técnica y económica, se seleccionó un sensor de la serie MPX específicamente el sensor MPX5500, como se muestra en la Figura 2.12. Este sensor es de tipo piezoresistivo y puede medir presiones manométricas en un rango de 0 a 500 kPa (0 a 72.5 psi), lo cual es adecuado para las necesidades del equipo.

Figura 2.12. Sensor de presión MPX5500



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Si bien otros sensores como el transmisor industrial 4–20 mA o el Honeywell PX2 ofrecían mayor precisión o robustez mecánica, se priorizó el uso del MPX5500 por su costo, disponibilidad comercial y facilidad de integración en sistemas de control.

2.3.6 Válvula de alivio

Se procedió con su reemplazo por válvula regulable. Esta nueva válvula ofrece la ventaja de poder ajustarse a distintos rangos de presión, lo que permite un control de seguridad más preciso. Además, su diseño permite liberar la sobrepresión de manera gradual, mejorando así la seguridad

2.3.7 Sistema de control

Se reemplazó por un sistema de control digital basado en Raspberry Pi 4 B.

La elección se basó en el costo que implicaría implementar un PLC con una pantalla HMI y un módulo para la lectura de entradas analógicas, los cuales no están incluidos en el equipo actual. Dicha implementación tendría un costo aproximado de 10,000 Bs.

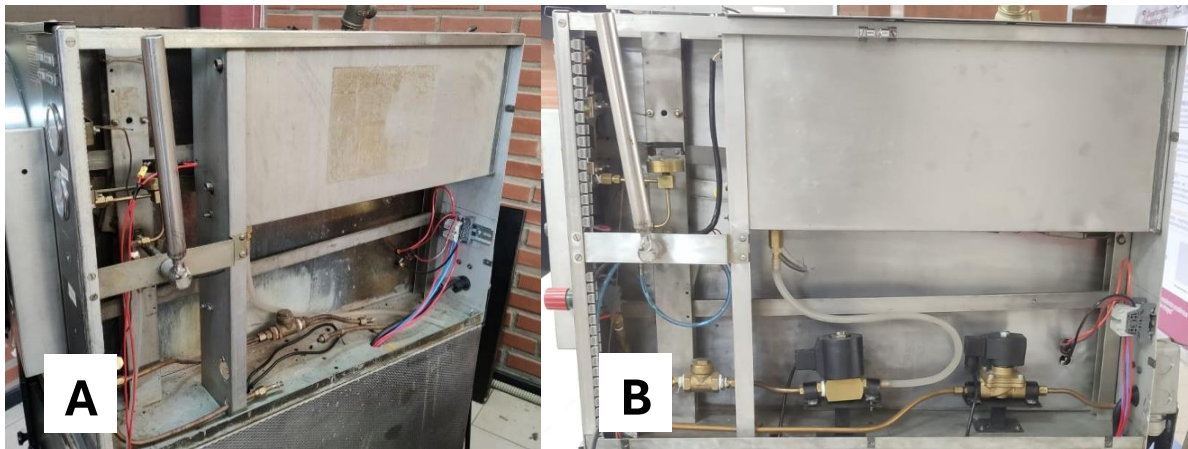
En contraste, la Raspberry Pi que permite la conexión de cualquier pantalla con puerto HDMI y una implementación de entradas analógicas a bajo costo. Además, ofrece una

gran flexibilidad en la programación, ya que es compatible con diversos lenguajes de programación.

2.3.8 Sistema de tuberías

Se procedió a desmontar componentes obsoletos (Ver figura 2.13 A) e innecesarios para reorganizar, modificar el sistema actual y obtener una estructura de tuberías más comprensible y visible para los estudiantes. Como se muestra en la Figura 2.13 B.

Figura 2.13. Rediseño de sistema de tuberías



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

2.4. DISEÑO ESTRUCTURAL

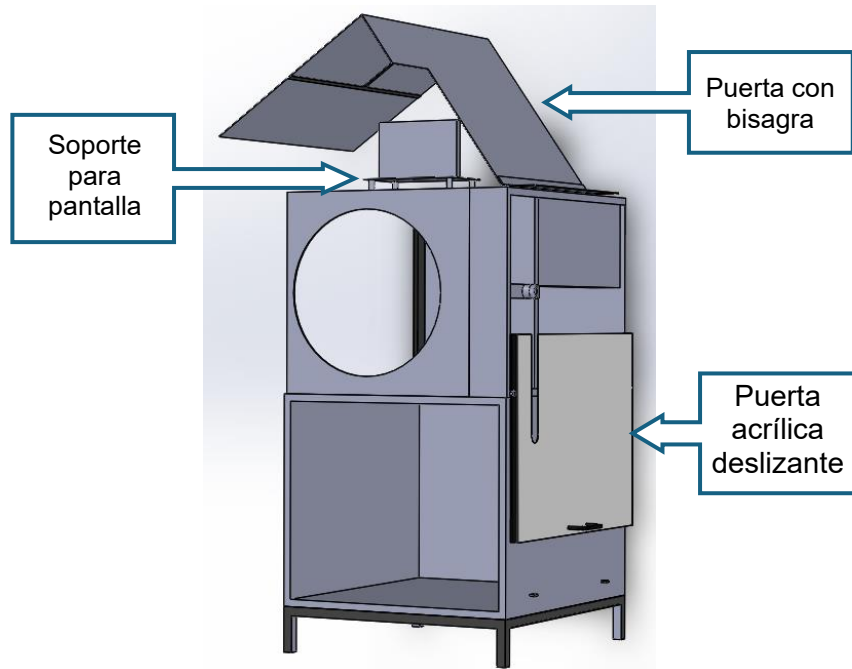
El diseño estructural del equipo se llevó a cabo utilizando el software de diseño SolidWorks, para tener una visión clara antes del desarrollo, con el propósito de optimizar su accesibilidad, funcionalidad y apariencia. La nueva estructura busca mejorar la interacción del usuario, permitiendo una visualización clara y un acceso rápido a los componentes internos para la identificación, toma de mediciones eléctricas y la realización de tareas de mantenimiento.

Para lograr estos objetivos, se diseñó una estructura que incorpora:

- Soporte para la pantalla, facilitando su visualización y uso.
- Puerta con bisagra, que permite un acceso práctico a elementos clave como las resistencias, termostato, sensor de temperatura y la válvula de alivio.
- Puerta acrílica deslizante, que proporciona una visualización directa del circuito de tuberías y las electroválvulas, sin necesidad de desmontar componentes.

En la Figura 2.14, se muestra el modelo estructural optimizado, donde se pueden observar las mejoras implementadas.

Figura 2.14. Representación gráfica etapa inicial



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Este diseño representa una mejora significativa con respecto a la configuración inicial del equipo, en la que el acceso a los componentes internos requería desmontar tapas metálicas y retirar una serie de tornillos, lo que implica un proceso laborioso y poco práctico. Esta nueva estructura optimiza significativamente la operatividad del equipo y mejora la experiencia del usuario, brindando un sistema más didáctico y funcional.

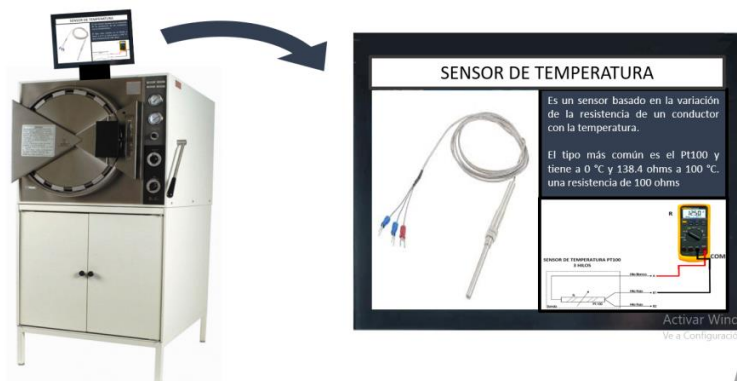
2.5. DISEÑO DE SECUENCIA EDUCATIVA DIDACTICA

El sistema se diseñó con 4 etapas educativas que se describen a continuación:

2.5.1. Primera Etapa

Se realizó la identificación, explicación y actividades prácticas de mantenimiento de los componentes del equipo como también del sistema de tratamiento de agua, todo esto guiado por medio de la pantalla, como se muestra en la Figura 2.15. Esta etapa busca que los estudiantes visualicen y conozcan a cabalidad el funcionamiento de los componentes del sistema.

Figura 2.15. Representación gráfica etapa inicial



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.2. Segunda Etapa

Se demuestra el funcionamiento interno de la autoclave, visualizado en la pantalla por medio de un diagrama sinóptico animado, haciendo seguimiento de todo el proceso de esterilización (calentamiento, esterilización, despresurizado, secado y enfriamiento) y flujo de activación tanto de sensores y actuadores, como se muestra en la Figura 2.16. Este proceso permite demostrar el papel que desempeña cada componente para el funcionamiento del equipo.

Figura 2.16. Representación gráfica segunda etapa

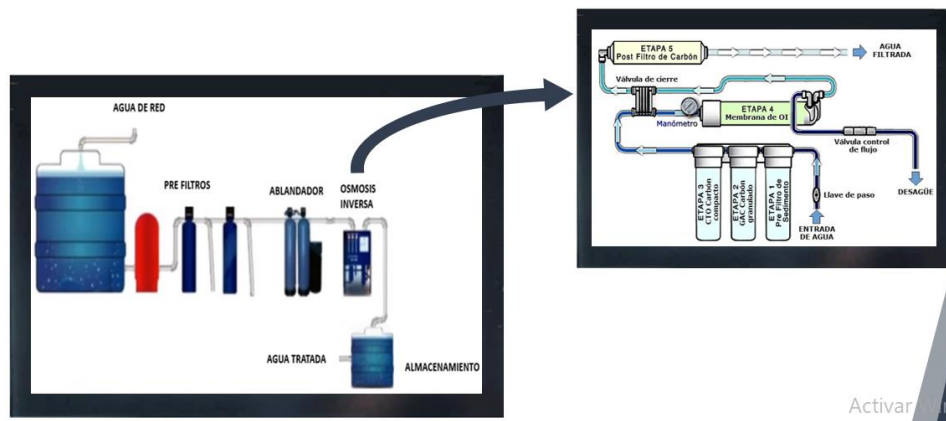


Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.3. Tercera etapa

Se muestra el funcionamiento del sistema de tratamiento de agua, haciendo seguimiento paso a paso de todo el proceso de tratamiento (Pre-filtro, ablandador, osmosis inversa y almacenamiento), de igual forma se visualiza en la pantalla táctil por medio de una representación gráfica animada. En la Figura 2.17 se muestra una representación gráfica.

Figura 2.17. Representación gráfica tercera etapa



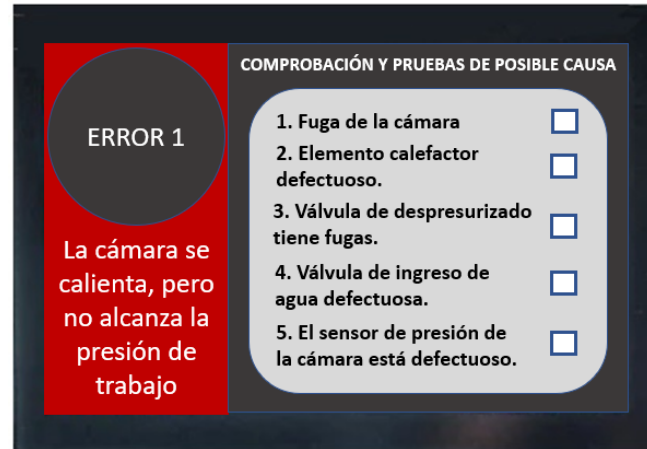
Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.4. Cuarta etapa

Se muestra las fallas más recurrentes que presenta este sistema, donde el estudiante tendrá que seguir y realizar una serie de comprobaciones y pruebas para determinar la posible causa de la falla, como se muestra en la Figura 2.18. En esta etapa el estudiante podrá integrar todos los conocimientos adquiridos en etapas previas y tener una idea

clara del procedimiento a seguir para dar mantenimiento a este tipo de equipos en un ambiente laboral real.

Figura 2.18. Representación gráfica etapa final



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.6. DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA CON ENFOQUE DEMOSTRATIVO

Con el fin de garantizar la calidad del agua utilizada en los ciclos de esterilización y evitar daños en los componentes de la autoclave, se diseñó una planta de tratamiento de agua con enfoque demostrativo, Esta planta está destinada al uso académico en el laboratorio de Ingeniería Biomédica, permitiendo a los estudiantes observar y operar un sistema real de purificación de agua.

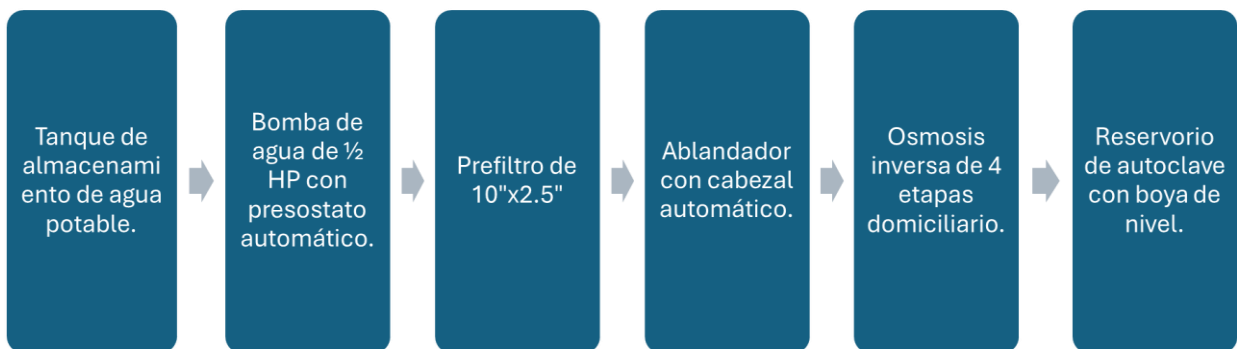
El sistema inicia en un tanque de almacenamiento de agua o suministro potable proveniente de red municipal. Desde este tanque, una bomba de 1/2 HP equipada con cabezal presostato automático, que asegura el suministro constante y mantiene la presión dentro del rango requerido e impulsa el agua hacia una etapa de prefiltrado que retiene partículas suspendidas y sedimentos.

Posteriormente, el agua pasa a un ablandador con cabezal automático, encargado de reducir la dureza, protegiendo así a la autoclave de incrustaciones calcáreas. Finalmente,

el agua tratada se somete a un proceso de ósmosis inversa de tipo domiciliario, eliminando sales disueltas, cloruros y otros contaminantes.

El agua purificada es almacenada en el reservorio de la autoclave, cuyo nivel se regula mediante una boya de control, garantizando un suministro constante y seguro. Este montaje no solo asegura la calidad del agua de proceso, sino que también permite a los estudiantes conocer y operar un sistema de tratamiento en tiempo real, reforzando conceptos de control de calidad de agua y mantenimiento de equipos biomédicos. En la Figura 2.19 se muestra un diagrama esquemático de la planta de tratamiento.

Figura 2.19. Diagrama esquemático de planta de tratamiento de agua para autoclave



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los componentes principales seleccionados fueron:

Prefiltro de entrada de 10"x 2.5":

- Instalado antes del suavizador, permite la retención de partículas suspendidas, arena o residuos de óxido, mejorando la vida útil del sistema completo.

Suavizador inteligente – Modelo FCV0915F:

- **Tipo de regeneración:** automática por volumen, controlada por caudal.
- **Capacidad de flujo:** ≤ 1.5 toneladas/hora (equivalente a 1500 litros/hora).

- **Volumen de resina:** 6.5 litros, suficiente para tratamiento de agua municipal con dureza estándar.
- **Tiempo de regeneración:** aproximadamente 60 minutos.
- **Presión de operación:** 0.15 a 0.30 MPa.
- **Consumo eléctrico:** 18 W.
- **Dimensiones:** 400 x 220 x 590 mm.

Este suavizador permite prolongar la vida útil del sistema de ósmosis inversa y reducir el riesgo de incrustaciones en resistencias o tuberías, asegurando una calidad estable del agua de entrada.

Sistema de ósmosis inversa RO 50 GPD:

- **Producción nominal:** 50 galones por día (189 litros/día).
- **Tensión de operación:** 220 V AC / 50 Hz.
- **Tipo de uso:** residencial, con diseño compacto.
- **Presión de trabajo mínima requerida:** 0.28 MPa (compatible con la salida del suavizador).

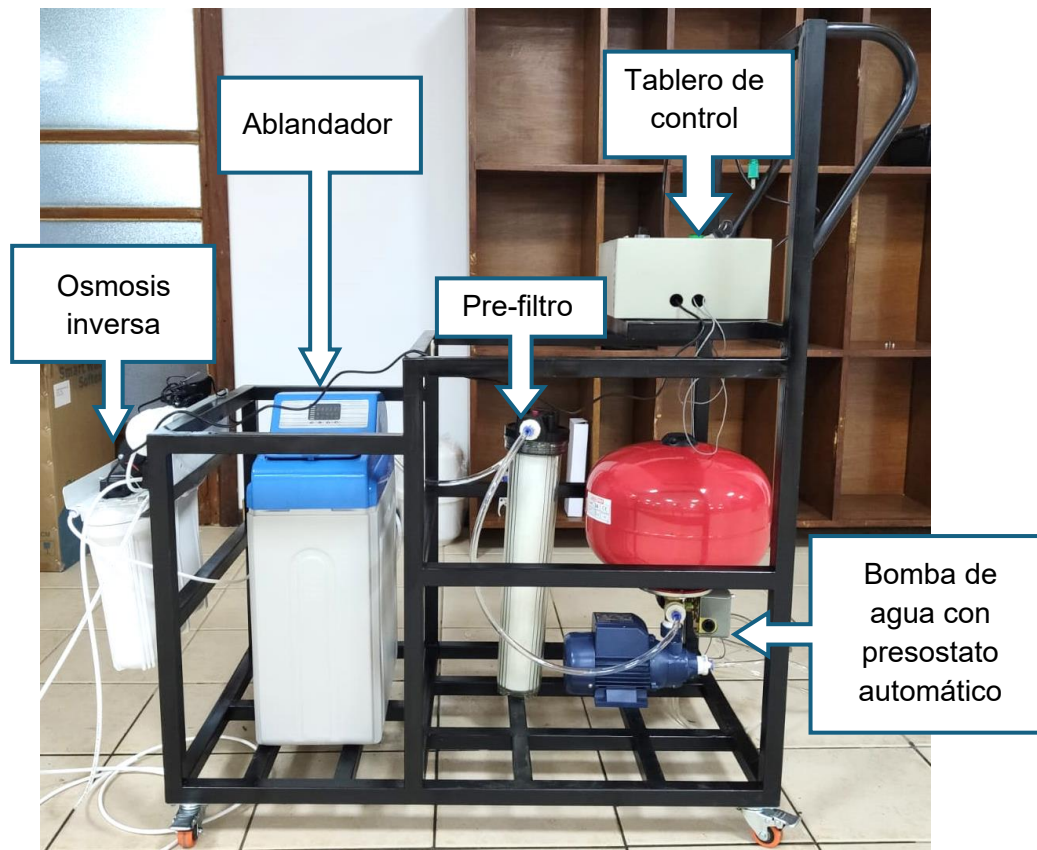
Este equipo asegura la remoción de sólidos disueltos totales (TDS), microorganismos y otros contaminantes que pudieran interferir con la calidad del proceso de esterilización. El agua purificada es enviada al reservorio de la autoclave, cuya capacidad es de 15 litros, y que está regulado mediante un sistema de boya que corta automáticamente el suministro al alcanzar el nivel máximo.

Producción estimada:

Bajo la producción nominal de 189 litros por día de mi sistema de osmosis inversa, equivalente a aproximadamente 7.9 litros por hora. Esta tasa de producción permite llenar completamente el tanque en aproximadamente 2 horas, dependiendo de la presión de entrada, el estado de los filtros y la calidad del agua bruta.

Además de garantizar la calidad del agua de proceso, esta planta permite a los estudiantes interactuar con tecnologías reales de tratamiento, reforzando conceptos asociados a la esterilización. En la Figura 2.20 el diseño de la planta final.

Figura 2.20. Planta de tratamiento de agua.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

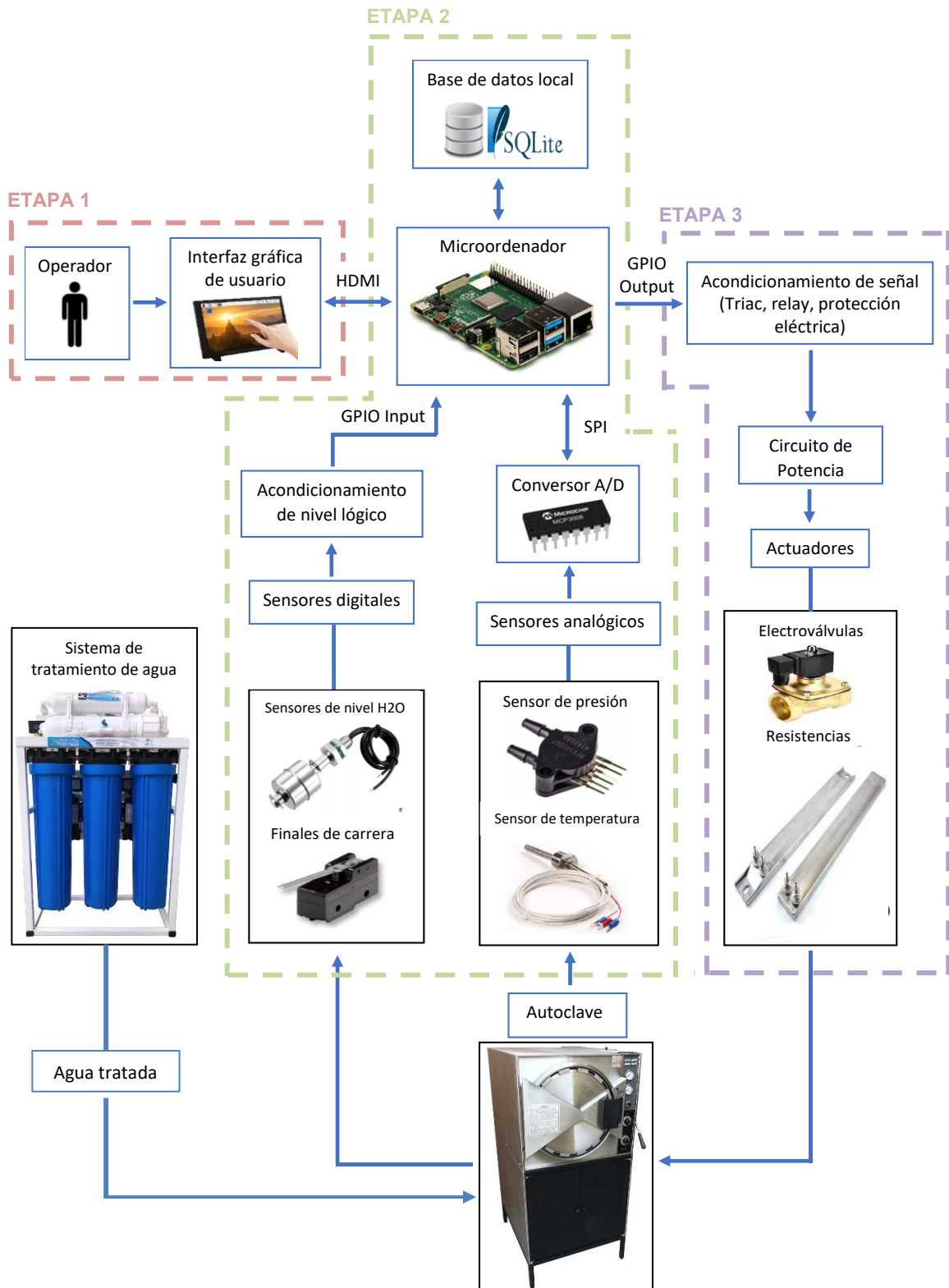
2.7. DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONTROL

2.7.1. ESQUEMA GENERAL

La eficacia y funcionamiento óptimo de cualquier sistema depende en gran medida de la coherente interacción entre sus componentes fundamentales. En este contexto, el presente diagrama de bloques no solo ofrece una visión general, sino que también delinea las etapas fundamentales para comprender la estructura y el flujo operativo del proyecto.

A través de este esquema, se puede apreciar cómo cada una de estas etapas interactúa de manera coordinada para lograr los objetivos establecidos, como se muestra en la Figura 2.21. Desde la interacción inicial entre el usuario y el dispositivo, pasando por el control y la generación/captación de señales, hasta la ejecución mediante el mecanismo actuador, cada fase desempeña un papel importante en el funcionamiento eficaz del sistema en su conjunto.

Figura 2.21. Diagrama de bloques



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El sistema se compone de 3 etapas funcionales:

1. Interacción usuario–dispositivo: Esta etapa se caracteriza por la interacción directa entre el operador y el sistema a través de una interfaz gráfica intuitiva. Para este fin se usó una pantalla de panel táctil, proporcionando al operador acceso inmediato para iniciar y visualizar las funcionalidades del equipo de manera eficiente y práctica.

2. Control y generación/captación de señales: etapa compuesta por el microordenador u ordenador de placa única raspberry pi, encargado de monitorizar de forma continua el estado de diversos tipos de sensores, tanto analógicos como digitales, y de enviar las señales necesarias para controlar los actuadores del sistema, permitiendo así la ejecución del proceso de esterilización y otras funcionalidades del equipo de manera controlada y retroalimentada.

Para cumplir con este propósito, se considera la utilización de sensores analógicos, tales como el sensor de presión manométrica MPX5500DP, capaz de detectar niveles de presión en un rango de 0 a 500 kPa, y el sensor de temperatura PT100, con un rango de trabajo entre -100°C y 200°C , adecuados para las exigencias del proyecto. Estos sensores serán sometidos a una etapa de conversión analógica a digital, externa al microordenador debido a la falta de esta funcionalidad integrada, para luego ser transmitidos a través de una comunicación SPI al dispositivo microordenador.

Además, se contempla la utilización de sensores digitales, como 2 sensores de nivel de líquidos y dispositivos finales de carrera, para monitorear el nivel de agua en el reservorio y detectar la posición de los componentes dentro del sistema mecánico del equipo, respectivamente. Los datos generados por estos sensores serán registrados y almacenados en una base de datos local desarrollada con el software SQLite para su posterior análisis y visualización.

3. Mecanismo actuador: Esta etapa se caracteriza por la presencia de un circuito de potencia, compuesto por Triacs, relés de estado sólido y dispositivos de protección

eléctrica. Estos elementos tienen la función de separar la corriente alterna que consumen los actuadores de la corriente continua que alimenta la etapa de control.

Entre los actuadores que forman parte de esta etapa se encuentran 7 resistencias eléctricas y 2 electroválvulas industriales para vapor. Son estos dispositivos los encargados de recibir las órdenes emitidas desde la etapa de control, permitiendo su puesta en marcha o su detención de manera precisa y coordinada.

2.8. DESARROLLO DEL SISTEMA

2.8.1. DESARROLLO DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Las modificaciones estructurales se realizaron en el taller de metalmecánica de la Universidad, contando con el apoyo técnico para labores de soldadura y corte. El proceso se ejecutó siguiendo el diseño elaborado previamente en SolidWorks, comenzando con la toma de medidas y marcado de las piezas, para luego proceder con los trabajos de corte, unión y montaje de los componentes. En la Figura 2.22, se observan las actividades de corte y soldadura realizadas durante este proceso hasta realizar el montaje final.

Figura 2.22. Proceso de rediseño estructural.



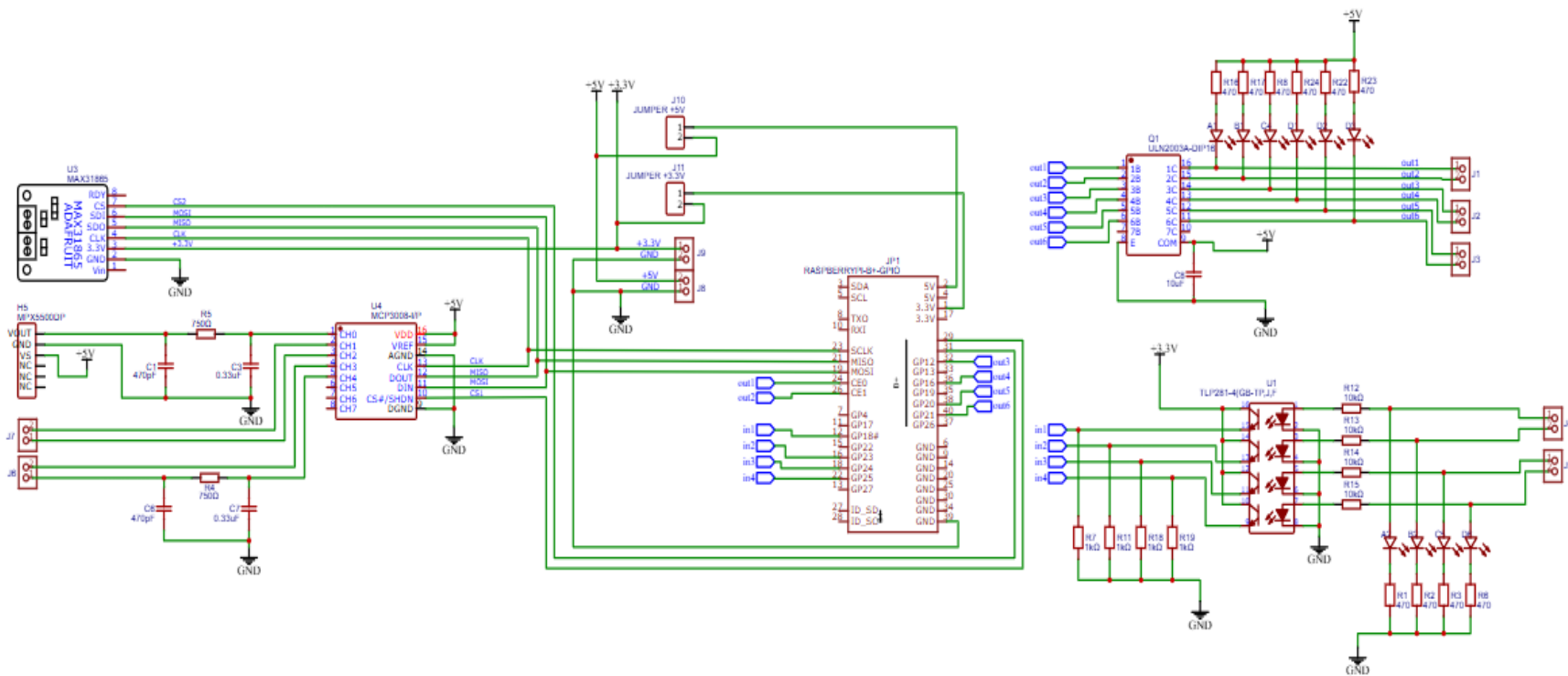
Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.2. DESARROLLO DE PLACA DE CONTROL Y GENERACIÓN/CAPTACIÓN DE SEÑALES

Para el diseño de la placa de control se utilizó la plataforma en línea EasyEDA que es una herramienta de diseño electrónico en la nube que permite crear circuitos esquemáticos, simular circuitos y diseñar PCB (Placas de Circuito Impreso) con gran libertad, al contar con una biblioteca extensa con miles de componentes electrónicos.

Para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro de los sensores y actuadores, se desarrolló el siguiente diagrama de circuito de acondicionamiento de señales, como se muestra en la Figura 2.23, el mismo que será desglosado en sus diferentes secciones a continuación, explicando el funcionamiento de cada componente y su integración dentro del sistema.

Figura 2.23. Circuito de placa de control y generación/captación de señales



Fuente: Elaboración propia, 2025.

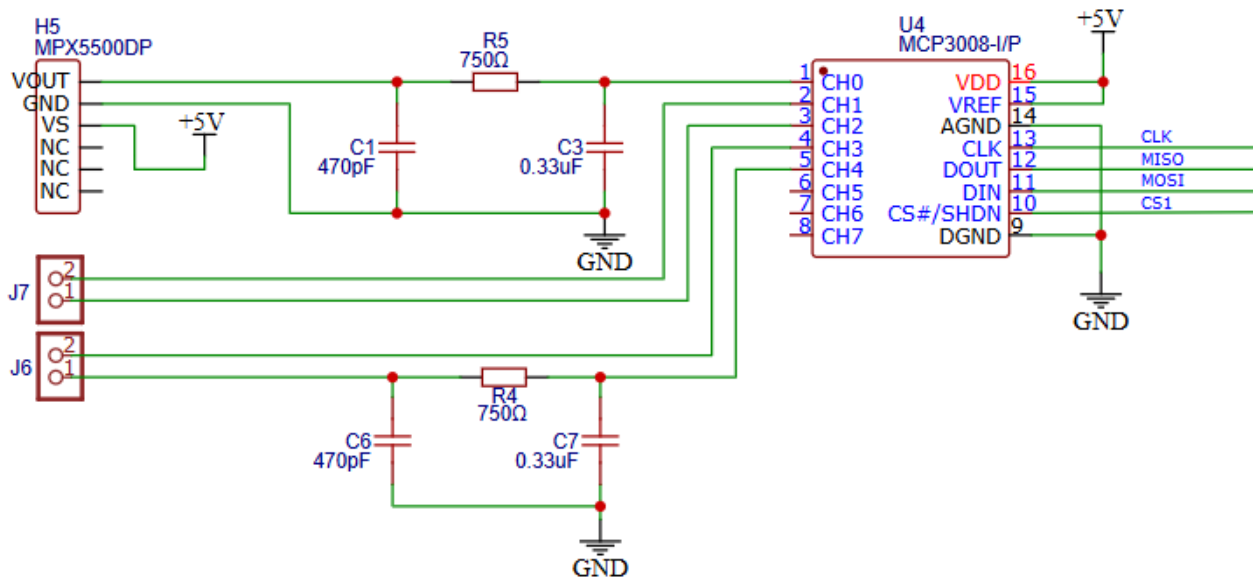
Como base para el diseño del sistema, se tomaron en cuenta las especificaciones técnicas del microordenador Raspberry Pi 4B, el cual no dispone de entradas analógicas integradas, las cuales son esenciales para digitalizar las señales eléctricas provenientes de los sensores empleados en el sistema, como el sensor de temperatura PT100 y el sensor de presión MPX5500. Además, sus pines de salida digitales operan a 3.3V con una corriente limitada, lo que no es suficiente para el accionamiento directo de ciertos actuadores.

Acondicionamiento de Entradas Analógicas: La lectura de señales analógicas fue realizada mediante el conversor analógico-digital MCP3008, seleccionado por presentar características o especificaciones técnicas compatibles con Raspberry Pi, ya que utiliza el protocolo de comunicación SPI, presenta 10 bits de resolución, permite un rango de alimentación de 2.7 v a 5.5 v y puede leer hasta 8 señales analógicas.

El diseño del circuito está orientado a la lectura del sensor de presión MPX5500, que proporciona una señal de voltaje de salida en el rango de 0.2 V a 4.7 V DC, la cual es proporcional a la presión aplicada en un rango de 0 a 500 kPa. Dado que el equipo operará en ciclos de esterilización a 121°C, la presión absoluta de trabajo será de 2.05 bar (205 kPa). Considerando la altitud de Cochabamba (2558 m.s.n.m.), la presión atmosférica típica en la región es de 0.75 bar (75 kPa), por lo que la presión manométrica real con la que trabajará el sensor no superará los 1.35 bar (135 kPa). Por lo tanto, el sensor opera en un rango de voltaje de 0 a 1.5 V.

Para minimizar el ruido del sensor, se incorporó un filtro RC pasa bajos, recomendado por la hoja de datos del fabricante, antes de que la señal ingrese al conversor A/D. En la Figura 2.24 se muestra el circuito diseñado para la adquisición de señales analógicas, en el que se dejaron disponibles cuatro puertos adicionales para conexiones directas, lo que permite flexibilidad para futuras expansiones, redundancia en caso de fallas y facilita el mantenimiento.

Figura 2.24. Circuito de lectura de sensor MPX5500



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La relación entre la presión aplicada y el voltaje de salida se describe mediante la función de transferencia proporcionada en la hoja de datos del fabricante, la cual es:

$$V_{out} = V_S \cdot (0.0018 \cdot P + 0.04) \pm \text{Error} \quad (1)$$

donde V_{out} representa el voltaje de salida (en voltios), V_S es el voltaje de alimentación, y P es la presión medida en kilopascales (kPa). Despejando la presión, se obtuvo:

$$P = \frac{(V_{out}/V_S) - 0.04}{0.0018} \quad (2)$$

Esta ecuación permitió convertir directamente el voltaje leído por la Raspberry Pi en una medida de presión en kPa, facilitando el procesamiento digital.

La validación de las mediciones del sensor MPX5500 fue realizada mediante una comparación directa con un manómetro nuevo de la marca española Genebre, código de referencia 3820 004. Se monitorearon distintos niveles de presión, registrándose las lecturas simultáneamente en ambos instrumentos, como se muestra en la Figura 2.25,

observándose que las mediciones del sensor se encontraban dentro de un margen de error aceptable en relación con el instrumento patrón.

Figura 2.25. Registro simultáneo de presión



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los valores registrados se presentan en la Tabla 2.4, donde se evidenció un margen de error promedio de 1.38 kPa, lo cual se encuentra dentro del límite especificado por el fabricante. Según la hoja de datos del MPX5500, el error máximo es del 2.5 % de la escala

completa, lo que representa un posible desvío de hasta ± 3.375 kPa para presiones de hasta 135 kPa. Los resultados obtenidos en esta validación confirman que la precisión del sensor es adecuada para las condiciones de operación del sistema.

Tabla 2.4. Tabla comparativa de instrumentos de medición de presión.

Medición	Sensor de presión MPX5500 (kPa)	Manómetro Genebre (kPa)	Error absoluto (kPa)
1	10.24	10.50	0.26
2	20.82	21.30	0.48
3	41.85 kPa	42.75	0.90
4	51.60	50.20	1.40
5	81.74	80.00	1.74
6	102.68 kPa	100	2.68
7	129.20	127.00	2.20
Error promedio: 1.38 kPa			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

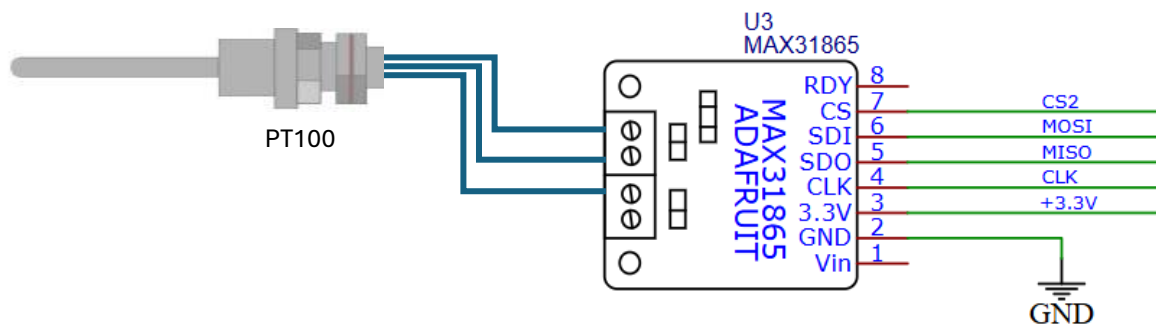
Por otro lado, para medir la resistencia de un sensor PT100, y convertir esa medida en una señal eléctrica que pueda ser leída por un microcontrolador o un sistema de adquisición de datos se requiere un circuito de acondicionamiento que típicamente se lo realiza con un puente de Wheatstone que puede ser complejo de configurar, calibrar y sensible a interferencias eléctricas y térmicas si no se maneja adecuadamente.

Sin embargo, en la actualidad existen diversas soluciones tecnológicas que ofrecen mediciones precisas y estables con menor susceptibilidad a interferencias. Este es el caso del módulo MAX31865 que es una solución más integrada y fácil de usar con una salida digital, lo que lo hace ideal para sistemas modernos de adquisición de datos y control.

El MAX31865 es un convertidor RTD a digital diseñado para medir la resistencia de un sensor RTD, como el PT100, y convertir esa medida en una señal digital, utilizando un ADC integrado de 15 bits y técnicas de compensación de errores para asegurar una medición precisa.

Este módulo fue seleccionado debido a su alta resolución y compatibilidad con la Raspberry Pi, ya que emplea comunicación mediante el protocolo SPI y puede operar con voltajes de alimentación de 3.3V o 5V. Estas características permiten una integración sencilla y eficiente con microcontroladores y sistemas embebidos. En la Figura 2.26 se muestra el esquema de conexión del módulo.

Figura 2.26. Circuito de lectura de sensor PT100



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El acondicionamiento de señales es esencial para convertir las señales de los sensores en un formato adecuado para su procesamiento digital, por lo que se aplicaron filtros por software con el fin de identificar y mitigar el impacto de valores atípicos o picos abruptos en los datos que podrían distorsionar el control.

Para ello, se aplicaron dos técnicas de filtrado: un filtro basado en la media y la desviación estándar, que detecta y reemplaza valores anómalos con el promedio de los datos, y un filtro de mediana, que reduce el ruido de alta frecuencia al reemplazar cada valor con la mediana de su vecindario. La combinación de estos filtros mejora significativamente la calidad de la señal, proporcionando mediciones más precisas y confiables para el correcto funcionamiento del sistema.

Para validar la precisión de las mediciones del sensor PT100 a través del módulo MAX31865, se utilizó la sonda de temperatura incorporada en la pinza amperimétrica UNI-T UT210C, reconocida por su fiabilidad y precisión en aplicaciones de medición industrial. Como se muestra en la Figura 2.27.

Figura 2.27. Registro simultaneo de temperatura



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Se realizaron lecturas simultáneas entre ambos instrumentos en distintos rangos de temperatura, desde ambiente hasta valores próximos a los 90 °C, como se detalla en la Tabla 2.5. La diferencia máxima observada fue de aproximadamente 2.1 °C por encima del instrumento patrón, con un error promedio de 1.62 valor considerado aceptable y corregible mediante un ajuste en el procesamiento de los datos, asegurando así la fiabilidad y robustez del sistema de adquisición de datos de temperatura.

Tabla 2.5. Tabla comparativa de instrumentos de medición de temperatura.

Medición	Max31865 - PT100 (°C)	UNI-T UT210C (°C)	Error absoluto (°C)
1	26.8	25	1.8
2	39.0	38	1.0
3	51.4	50	1.4
4	75.1	73	2.1
5	85.8	84	1.8
6	91.6	90	1.6
Error promedio: 1.62 °C			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

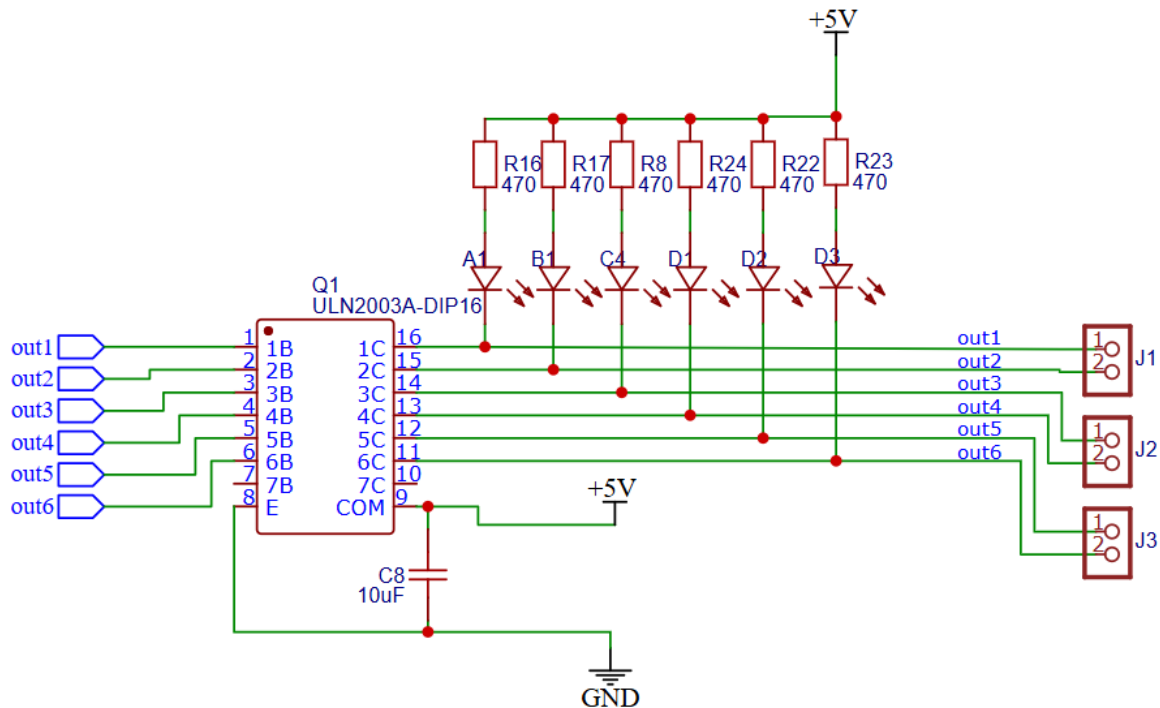
Salidas digitales: El circuito de salidas digitales fue diseñado para permitir el control de actuadores, como resistencias eléctricas, electroválvulas y un buzzer, garantizando un suministro de voltaje estable y eficiente para la activación de los relés de estado sólido (SSR), los cuales son empleados para la conmutación de los actuadores que operan con voltaje alterno (AC).

Debido a que la Raspberry Pi solo proporciona una tensión de 3.3V y tiene una capacidad máxima de 50 mA en todos sus pines GPIO combinados, en este caso, se requiere la activación de seis relés de estado sólido (SSR), cada uno con un consumo aproximado de 5 a 15 mA, lo que llevaría a la Raspberry Pi al límite de su capacidad.

Para solucionar esto, se diseñó el circuito de la Figura 2.28 basado en el ULN2003, un array de transistores Darlington de 7 canales, capaz de proporcionar hasta 500 mA por canal y soportar hasta 50V en la salida. Este integrado es compatible con señales de 3.3V y 5V, lo que permite una conexión directa con la Raspberry Pi sin necesidad de conversión de niveles de voltaje.

Para garantizar una salida de 5V con suficiente capacidad de corriente, se implementó una fuente de alimentación conmutada externa de 5V y 3A, la cual se conectó al ULN2003, evitando caídas de tensión y la sobrecarga de la raspberry pi. Además, se incorporaron LEDs indicadores para visualizar el estado de cada canal y borneras de salida.

Figura 2.28. Circuito de salidas digitales



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Entradas digitales: El diseño de las entradas digitales tiene como objetivo recibir señales de sensores digitales, como el final de carrera, utilizado para detectar si la puerta está abierta o cerrada, y los sensores de nivel tipo flotador, encargados de monitorear si el nivel de agua en el tanque es alto o bajo.

Para su funcionamiento, se utilizó una fuente externa de 5V que envía la señal de activación de los sensores ya que la corriente proporcionada por el controlador, previamente mencionado, sería insuficiente. Cuando un sensor se activa, devuelve una señal de 5V (estado ON), y cuando está desactivado, la señal es de 0V (estado OFF). Sin embargo, dado que la Raspberry Pi solo admite entradas de hasta 3.3V, fue necesario

diseñar un circuito de acondicionamiento de nivel lógico para evitar daños en los pines de entrada.

Este circuito utiliza el integrado TLP281-4, un módulo de optoacopladores de cuatro canales, que permite aislar eléctricamente las señales de los sensores y adaptar los niveles de voltaje de manera segura protegiendo de ruidos eléctricos y diferencias de voltaje. Cada canal incluye un LED indicador para visualizar su activación y una resistencia limitadora de 1 kΩ, que protege el LED interno del optoacoplador asegurando que la corriente no supere los 5 mA.

Cálculo de la resistencia limitadora

La resistencia limitadora se calcula con la ley de Ohm:

$$R = \frac{V_{\text{fuente}} - V_f}{I_f} \quad (3)$$

Donde: Según la hoja de datos del TLP281-4, el LED interno del optoacoplador tiene las siguientes características:

- $V_f = 1.2V$ Tensión directa del LED (valor típico)
- $I_f = 5mA$ Corriente recomendada
- $V_{\text{fuente}} = 5V$

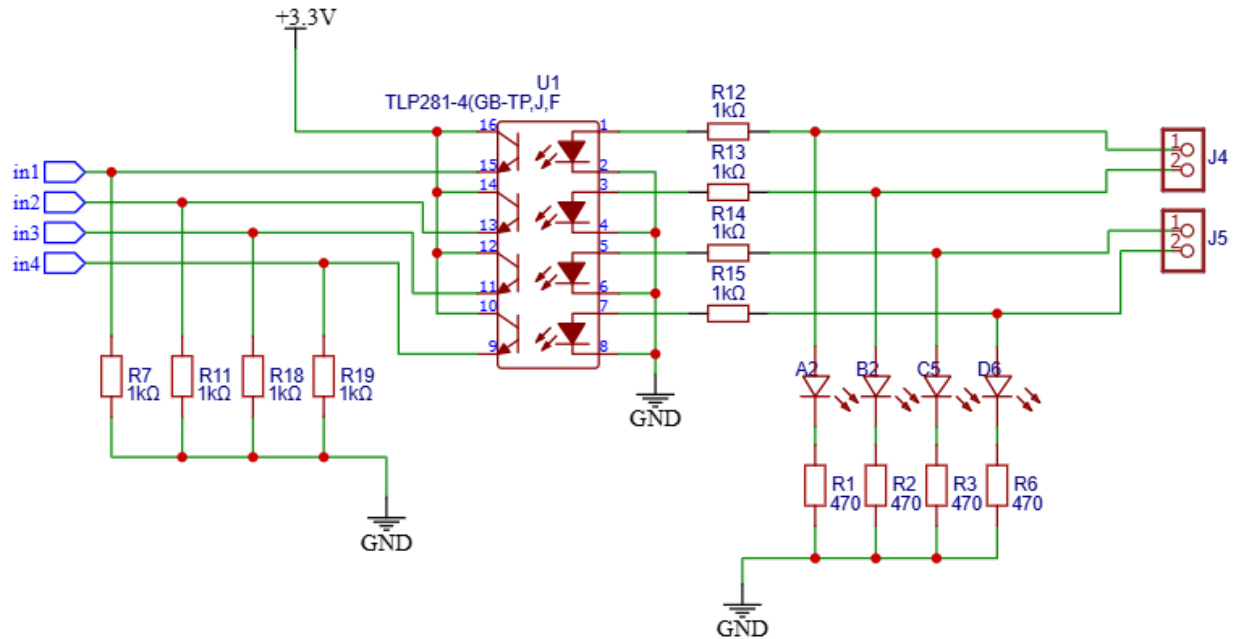
$$R = \frac{5V - 1.2V}{5mA} = \frac{3.8V}{0.005A} = 760\Omega \quad (4)$$

Valor comercial recomendado: 1 kΩ para reducir consumo y asegurar un funcionamiento estable.

El fototransistor del optoacoplador se configuro con un pull-down y alimentado con 3.3V provenientes de la Raspberry Pi. De este modo, cuando el sensor está activado, el fototransistor conduce, permitiendo que la Raspberry reciba una señal de 3.3V (estado alto). Cuando el sensor está inactivo, el fototransistor bloquea la señal, generando 0V (estado bajo).

En la Figura 2.29 se muestra el esquema del circuito, donde se puede observar la integración de los optoacopladores con las señales de entrada de la Raspberry Pi.

Figura 2.29. Circuito de entradas digitales

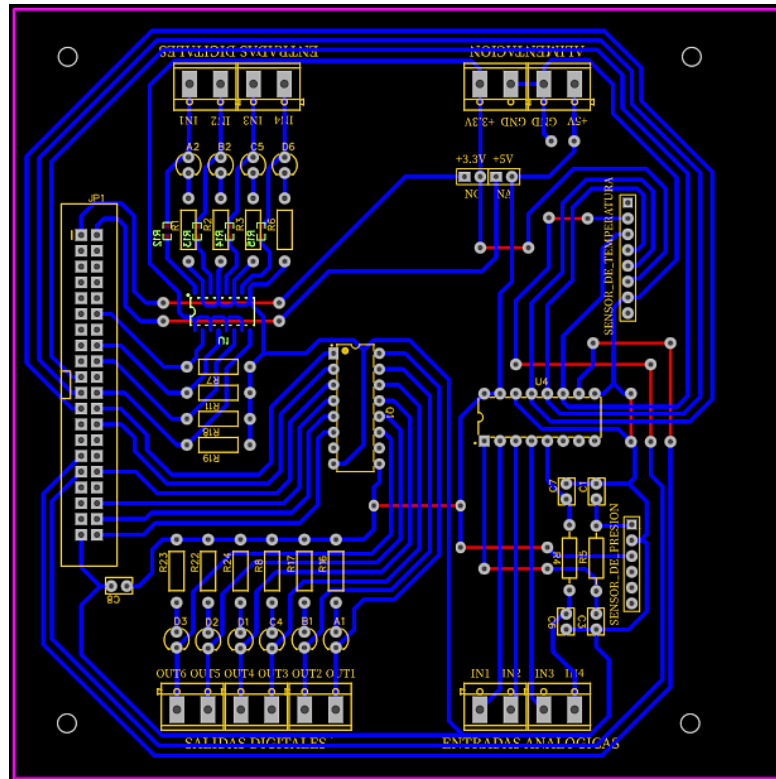


Fuente: Elaboración propia, 2025.

Una vez diseñado y probado cada circuito por separado, se procedió al diseño de la placa PCB, tomando en cuenta los niveles de voltaje y corriente que manejan los circuitos. Para ello, se siguieron las recomendaciones y características básicas establecidas en la norma IPC-2221, la cual proporciona directrices para el diseño de circuitos impresos en cuanto a espaciado, grosor de pistas y consideraciones térmicas y eléctricas.

Se determinó el ancho de las pistas en función de la corriente que deben soportar y la separación mínima entre ellas para evitar cortocircuitos o interferencias. Asimismo, se evitó el uso de ángulos superiores a 45 grados en las pistas para minimizar pérdidas y mejorar el flujo de electrones, como se puede ver en la Figura 2.30.

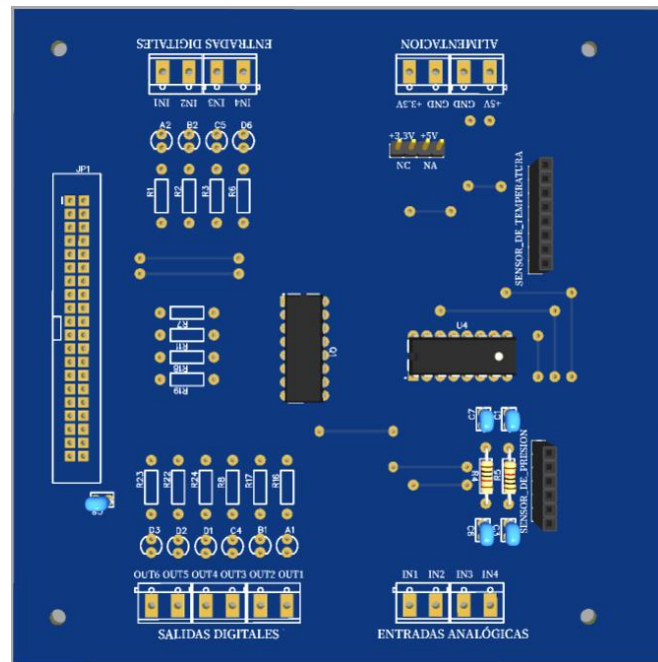
Figura 2.30. Ruteo de PCB



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 2.31 se presenta una vista en tres dimensiones del diseño final de la placa PCB, Esta cuenta con etiquetas de identificación de las distintas secciones de la placa, incluyendo salidas digitales, entradas analógicas, entradas digitales, borneras para la alimentación externa de 5V y 3.3V y pines de conexión para los sensores. Todas estas conexiones han sido estratégicamente distribuidas para facilitar la instalación, el cableado y el montaje en el tablero de control, asegurando una organización eficiente y un acceso intuitivo a cada componente.

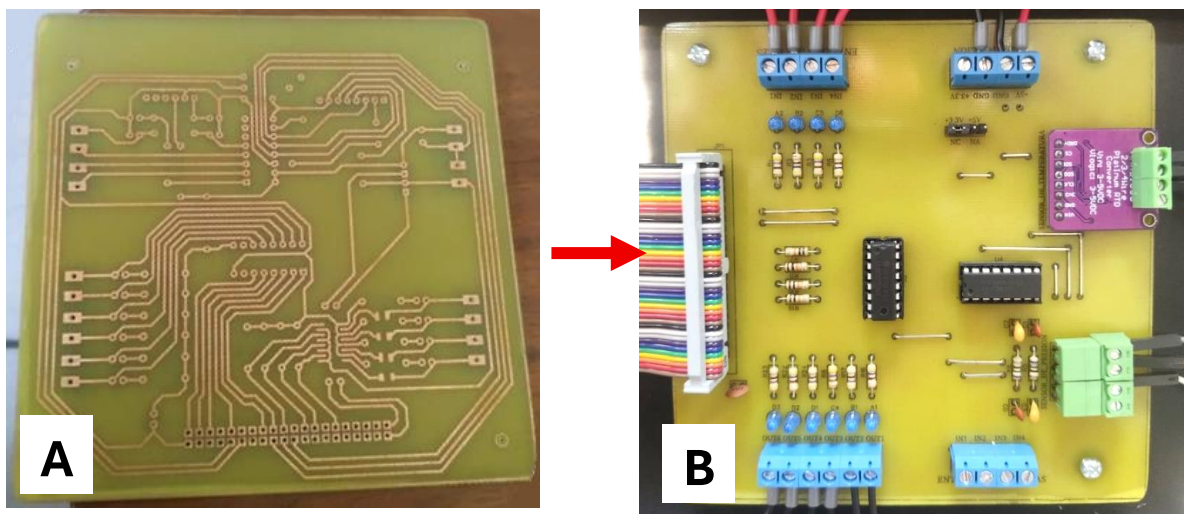
Figura 2.31. Vista 3D de placa electrónica final



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 2.32 A se muestra el proceso de quemado de pistas concluido y en la Figura 2.32 B se observa el montaje físico final de la PCB. Estas imágenes permiten visualizar la disposición de los componentes, la calidad de las conexiones y el ensamblaje general de la placa.

Figura 2.32. PCB de control y generación/captación de señales



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.3. MECANISMO ACTUADOR

Para el control de las resistencias eléctricas, se diseñó un sistema basado en relés de estado sólido (SSR), como se explicó anteriormente las resistencias están divididas en dos grupos en paralelo: el primero compuesto por cuatro resistencias con un consumo de 7.988 A, y el segundo por tres resistencias con un consumo de 11.55 A, ambos operando a 220V AC.

Dado que el sistema trabaja con corriente alterna (AC), se emplearon TRIACs, dispositivos semiconductores de potencia adecuados para el control de cargas resistivas. La selección de los TRIACs se realizó en función del consumo de corriente de cada grupo de resistencias:

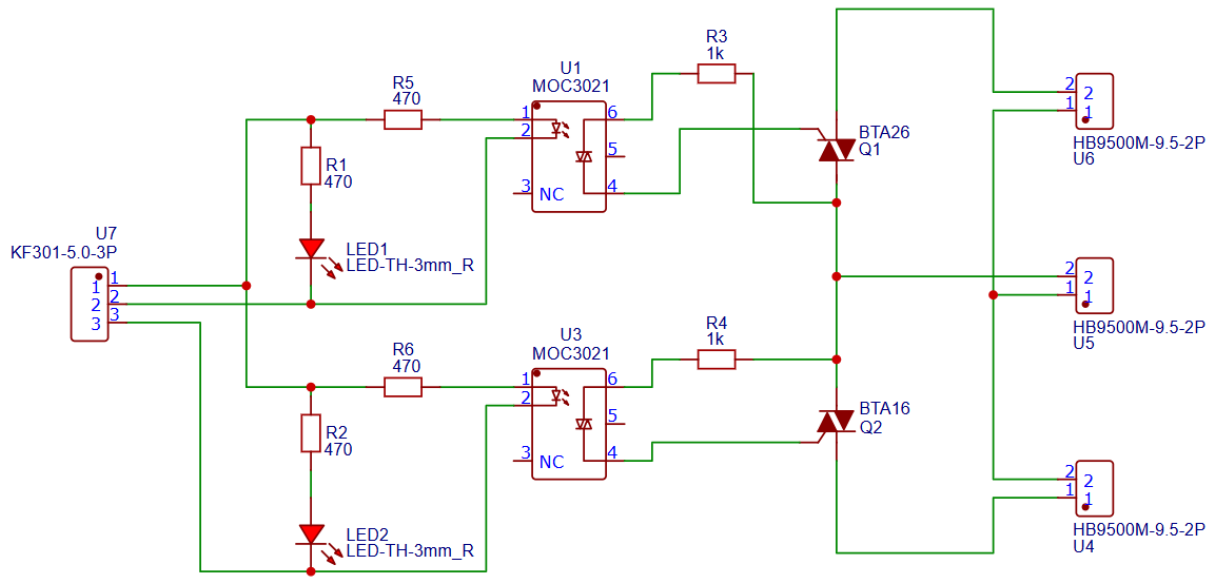
- BTA16: utilizado para el grupo de cuatro resistencias en paralelo, con una resistencia equivalente de 27.54Ω y una corriente de 7.988 A.
- BTA26: empleado en el grupo de tres resistencias en paralelo, con una resistencia equivalente de 19.04Ω y un consumo de 11.55 A.

La elección de estos TRIACs se fundamentó en su capacidad de corriente, asegurando un margen de seguridad sobre el consumo de cada carga para evitar el sobrecalentamiento y mejorar la durabilidad del sistema. Además, estos componentes pueden soportar picos de corriente transitorios, asegurando estabilidad frente a variaciones de voltaje y conmutaciones frecuentes.

Para garantizar un aislamiento eléctrico entre el circuito de control (baja tensión) y el de potencia (alta tensión), se utilizaron optotriacs MOC3021. Estos dispositivos permiten activar los TRIACs de potencia de manera segura, evitando interferencias y protegiendo la electrónica de control.

Además, se incorporaron resistencias limitadoras de corriente en la entrada y salida de los MOC3021, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema. También se añadieron LEDs indicadores para señalar el estado de activación de cada canal, junto con borneras de conexión para la alimentación y salida de voltaje, como se ilustra en la Figura 2.33.

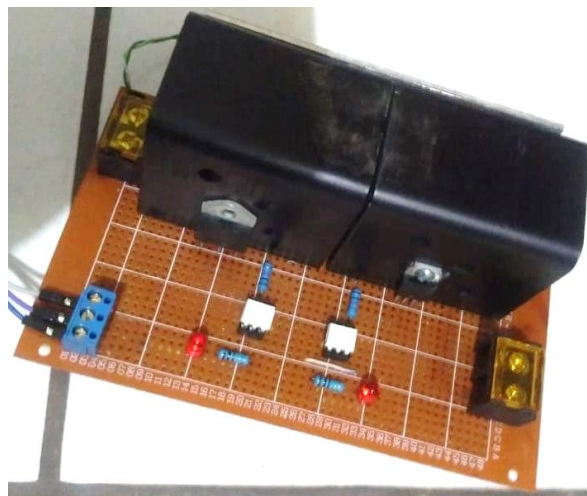
Figura 2.33. Circuito de control de resistencias eléctricas



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Posteriormente, se llevó a cabo la implementación de una primera versión del circuito en una placa perforada, como se muestra en la Figura 2.34.

Figura 2.34. Primera placa de prueba.



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Con esta placa, se realizaron pruebas de funcionamiento y mediciones del consumo de corriente de las resistencias utilizando una pinza amperimétrica. Estos valores fueron comparados con los cálculos teóricos, como se detalla en la siguiente Tabla 2.6:

Tabla 2.6. Tabla comparativa de consumo de corriente de resistencias

Resistencias eléctricas	Valor Medido	Valor Teórico
* 4 resistencias superiores	7.9 A	7.988 A.
* 3 resistencias inferiores	11.51 A	11.55 A

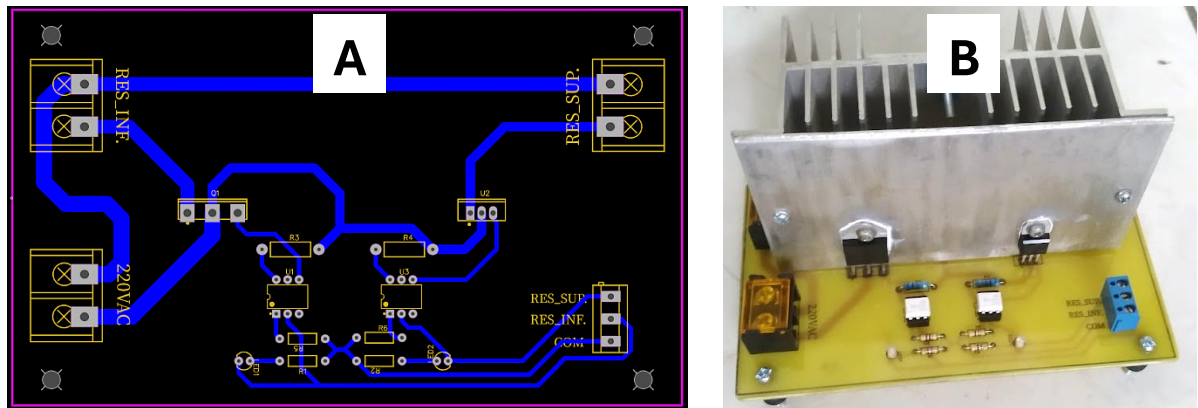
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los resultados obtenidos evidencian que el consumo real de corriente se encuentra dentro del margen esperado, validando así la precisión del diseño y asegurando su correcto funcionamiento en condiciones reales.

Adicionalmente, se evaluó el desempeño del optoacoplador, verificando su correcta activación y aislamiento eléctrico. Durante las pruebas, también se analizó la disipación de calor de los componentes de potencia, determinando que los triacs requieren un disipador de dimensiones considerables para evitar sobrecalentamiento y garantizar un funcionamiento estable y seguro.

Una vez realizadas las pruebas, se procedió con el ruteo de la placa PCB en la plataforma EasyEDA, optimizando la disposición de las pistas y componentes. En la Figura 2.35.A se puede observar el diseño final del ruteo en EasyEDA, mientras que en la Figura 2.35.B se muestra la implementación física de la PCB, lista para su integración en el sistema.

Figura 2.35. PCB de SSRs de potencia

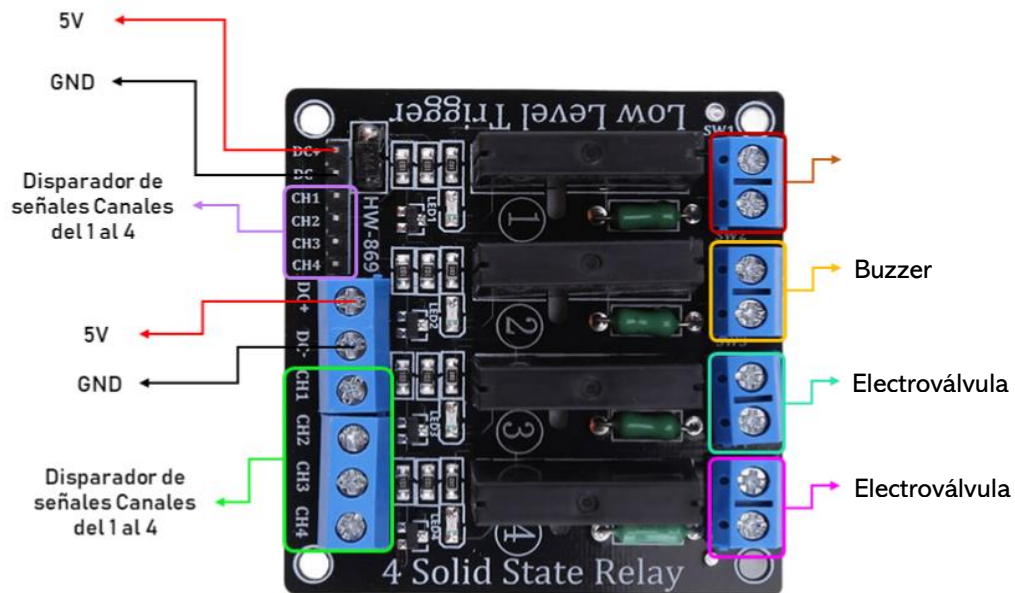


Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para el control de las dos electroválvulas y el buzzer del sistema, se utilizó un módulo de relé de estado sólido de cuatro canales con un voltaje de control de 5V. Este módulo es capaz de manejar cargas de corriente alterna de hasta 2 A por canal, lo que lo hace ideal para esta aplicación, ya que cada electroválvula tiene un consumo medido de 290 mA y el buzzer de 15 mA, valores ampliamente soportados por el módulo.

En la Figura 2.36 se presenta las conexiones del módulo, el cual se integra perfectamente con la placa de salidas digitales.

Figura 2.36. Conexión del Módulo SSR de 4 Canales.

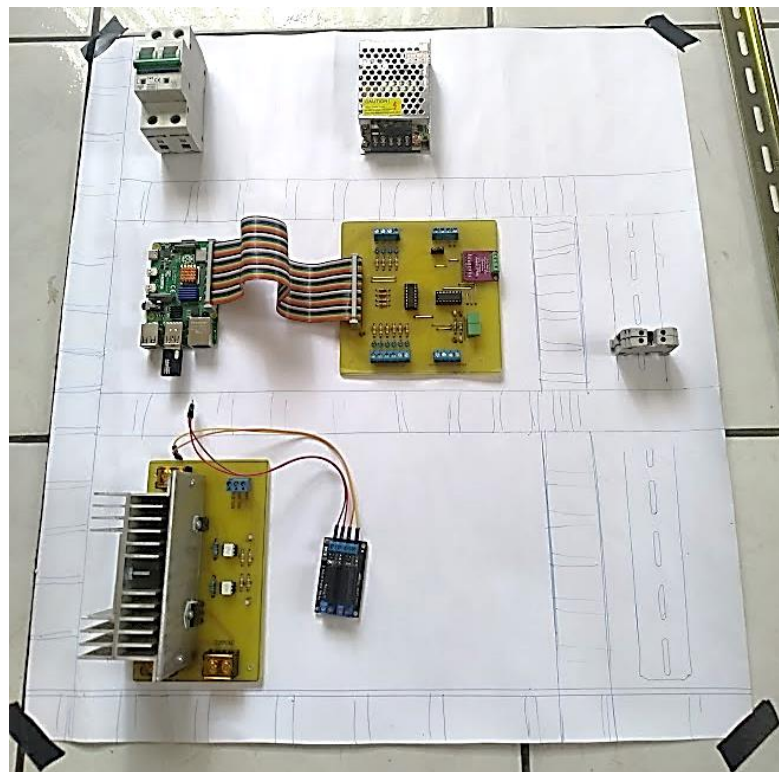


Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.4. MONTAJE Y DESARROLLO DE TABLERO DE CONTROL

El diseño del nuevo tablero de control se realizó considerando tanto la distribución eficiente de los componentes como la seguridad y facilidad de acceso para los usuarios. Para ello se inició con un análisis de las dimensiones del gabinete inferior del equipo, asegurando que todos los componentes pudieran integrarse de manera óptima dentro del espacio disponible. A partir de esto, se esquematizó la disposición de cada elemento hasta encontrar una distribución adecuada, como se muestra en la Figura 2.37.

Figura 2.37. Esquematación de tablero de control.



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

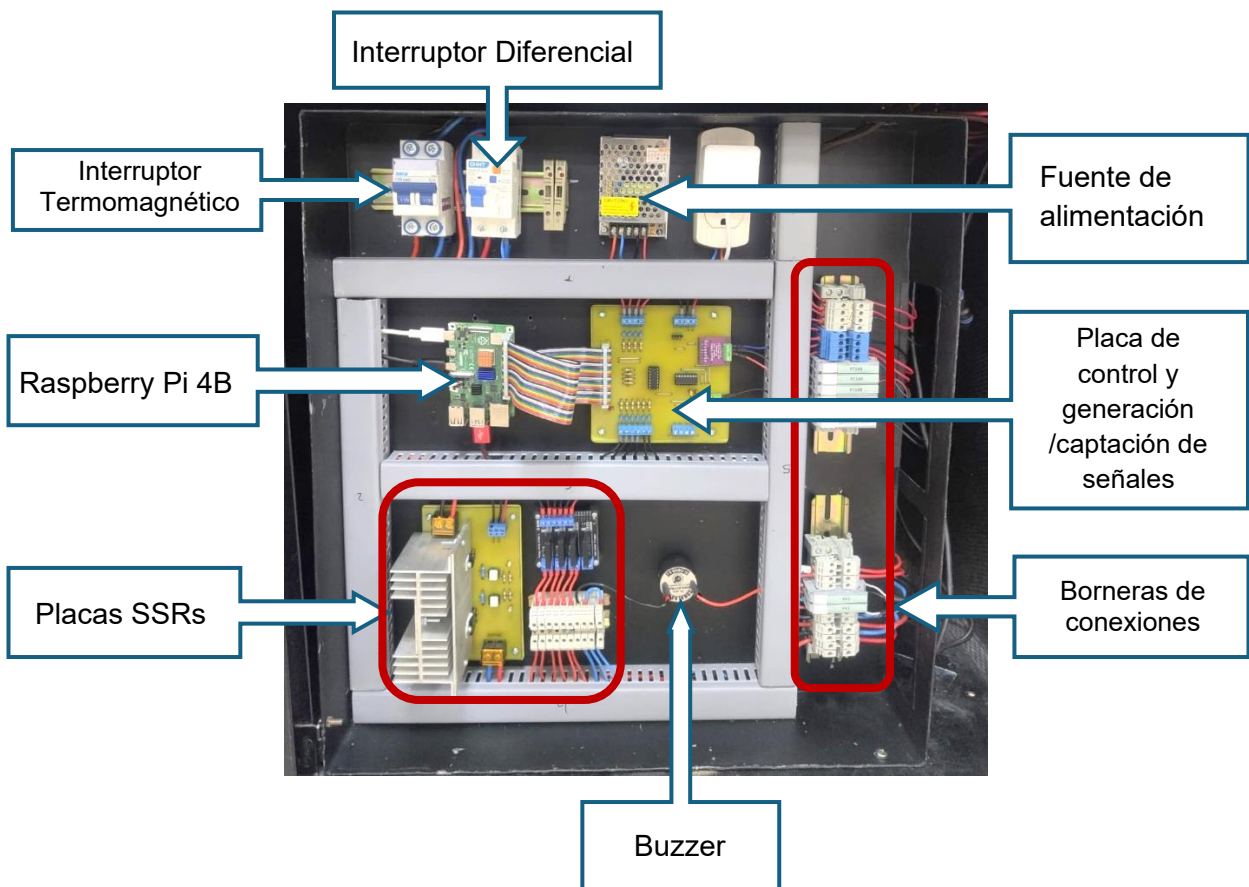
A partir de este análisis, se definió la disposición de cada componente dentro del tablero, buscando una distribución clara e intuitiva. Se implementaron cable canales y borneras industriales, lo que permitió una mejor gestión del cableado, minimizando desorden y facilitando futuras intervenciones técnicas.

La seguridad del usuario fue un aspecto clave en el diseño, por lo que se incorporó un interruptor diferencial, el cual protege ante posibles contactos directos con partes activas del sistema, reduciendo el riesgo de descargas eléctricas.

Además, la organización de los componentes fue pensada para que los usuarios puedan realizar mediciones eléctricas, ajustes o mantenimientos de manera sencilla y rápida, sin la necesidad de desmontar partes complejas del equipo.

En la Figura 2.38 se presenta el modelo estructural final, donde se pueden observar la organización de los componentes.

Figura 2.38. Tablero de control final.



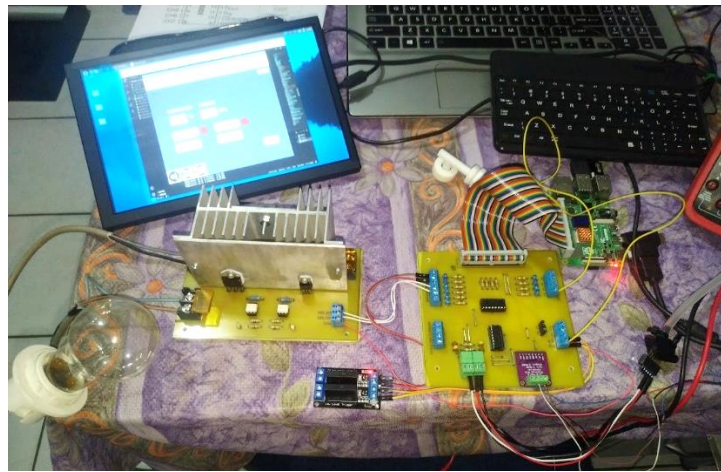
Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.5. DESARROLLO DE SOFTWARE DE SISTEMA DE CONTROL

El desarrollo de la programación del software de control de la autoclave fue de manera progresiva, se inició con una interfaz básica que permitía la activación y desactivación de actuadores de forma manual, así como también la lectura y visualización de los datos de sensores, esto para analizar la respuesta de los distintos componentes.

En la Figura 2.39 se muestra pruebas iniciales realizadas con el montaje de componentes esenciales.

Figura 2.39. Pruebas de funcionamiento manuales.

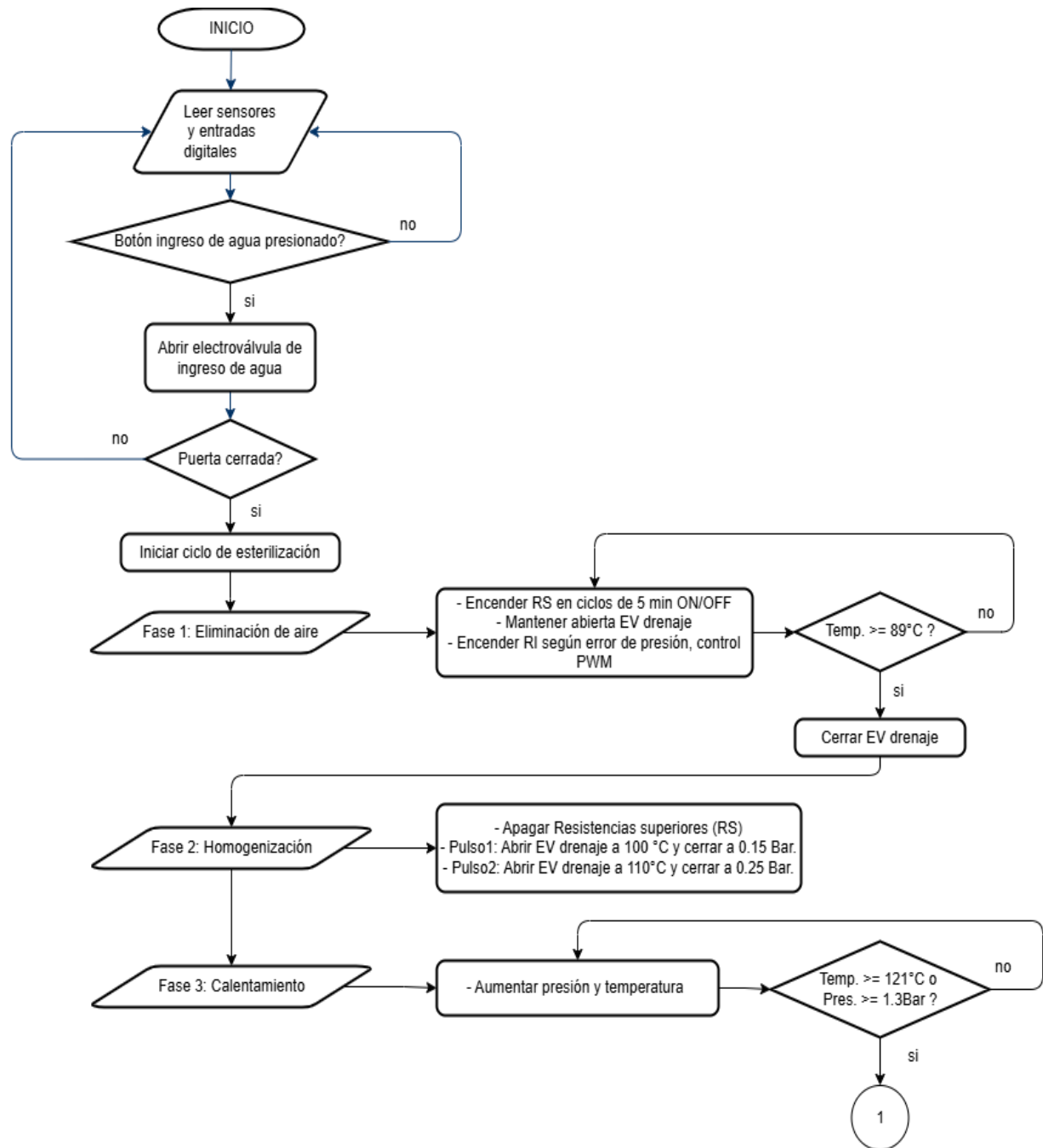


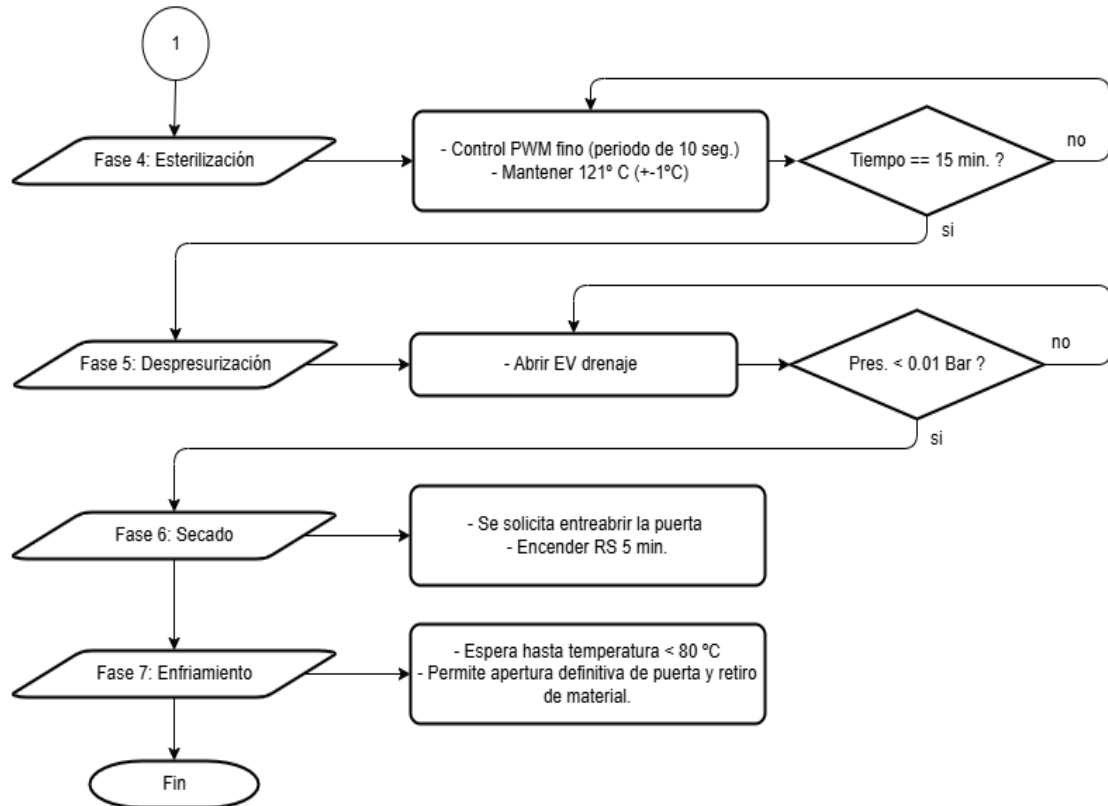
Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Una vez montado el tablero de control y obteniendo buena respuesta de funcionamiento de los actuadores y sensores se procedió a la automatización del ciclo de esterilización, la cual es la más crítica y compleja que requirió bastantes pruebas y ajustes para conseguir un funcionamiento correcto en base a autoclaves comerciales semejantes.

En la Figura 2.40 se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso automatizado del ciclo de esterilización.

Figura 2.40. Diagrama de flujo del ciclo de esterilización





Fuente: Elaboración propia, 2025.

El sistema opera en un bucle constante de lectura de sensores (temperatura, presión) y entradas digitales (estado de botones y finales de carrera). Para iniciar el ciclo de esterilización, se requieren dos condiciones fundamentales: primero, la activación manual del botón de ingreso de agua, que acciona la electroválvula correspondiente para llenar la cámara; segundo, la verificación automática del cierre hermético de la puerta mediante un sensor final de carrera. Estas precauciones garantizan la seguridad operativa desde el inicio del proceso. A continuación, se explicará cada fase del proceso de esterilización acorde a la programación.

- **Fase 1: Eliminación de Aire**

Esta etapa crítica prepara el ambiente interno para la esterilización efectiva. Las resistencias superiores se activan en ciclos alternados de 5 minutos (ON/OFF), generando pulsos de vapor que desplaza el aire frío. Simultáneamente, las resistencias inferiores se activan acorde a la implementación de un algoritmo PWM (Modulación por Ancho de Pulso) con periodo de 20 segundos, donde la potencia de calentamiento se ajusta dinámicamente según la diferencia entre la presión actual y el valor objetivo (1.3 bar). Así mismo la electroválvula de drenaje

permanece abierta para permitir la salida controlada de aire. La fase concluye automáticamente al alcanzar los 89°C, temperatura de ebullición típica en la región de Cochabamba.

- **Fase 2: Homogenización del Vapor**

Aquí se optimizan las condiciones del vapor mediante dos pulsos de presión estratégicos. El primer pulso se activa a 100°C, abriendo la electroválvula hasta reducir la presión a 0.15 bar. El segundo pulso ocurre a 110°C, con cierre programado a 0.25 bar. Este proceso de "remoción de vapor" elimina irregularidades y garantiza una distribución homogénea del vapor en toda la cámara, requisito esencial para la esterilización efectiva

- **Fase 3: Calentamiento**

Con las condiciones básicas establecidas, el sistema entra en modo de calentamiento controlado. Las resistencias inferiores trabajan bajo supervisión del control PWM, elevando progresivamente la temperatura y presión hasta alcanzar los parámetros críticos de 121°C y 1.3 bar. Durante este proceso, los sensores monitorean constantemente ambas variables para prevenir sobrepresiones o temperaturas excesivas.

- **Fase 4: Esterilización**

Al alcanzar los parámetros objetivo, se inicia el período de mantenimiento de 15 minutos, donde el sistema ejecuta un control PWM de más fino, para mantener la temperatura en 121°C \pm 1°C. Esta estabilidad térmica es fundamental para garantizar la destrucción de microorganismos, virus y bacterianas.

- **Fase 5: Despresurización**

Finalizado el tiempo de esterilización, se abre completamente la electroválvula de drenaje para reducir la presión interna de la cámara. El sistema verifica constantemente los valores hasta confirmar que la presión ha bajado a menos de 0.01 bar, señal que autoriza el inicio de la siguiente fase. Este procedimiento evita riesgos de apertura prematura y posibles accidentes por vapor a alta presión.

- **Fase 6: Secado**

Para eliminar residuos de humedad, el sistema solicita entreabrir ligeramente la puerta y activa las resistencias superiores durante 5 minutos. Esta acción genera una corriente de aire caliente que evapora la condensación residual, particularmente importante cuando se esterilizan materiales textiles o instrumentos con cavidades.

- **Fase 7: Enfriamiento**

Como última etapa de seguridad, el sistema no permite el inicio de un nuevo ciclo de esterilización hasta que los sensores confirman que la temperatura interna ha descendido por debajo de 80°C. Solo entonces se permite la extracción segura del material esterilizado. Durante este período, el sistema continúa monitoreando las condiciones para prevenir cualquier riesgo térmico al operador.

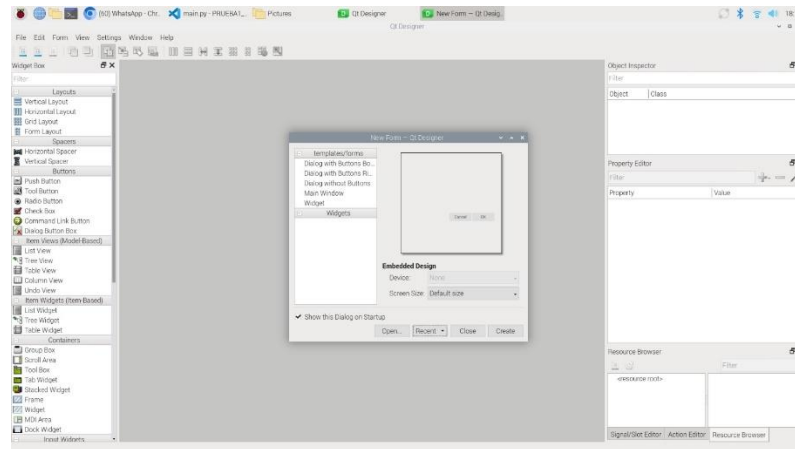
- **Finalizado**

El proceso final que realiza el ciclo de esterilización permite el guardado de todas las variables necesarias en la base de datos para reporte.

2.8.6. DESARROLLO DE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Para el Diseño de la interfaz gráfica se utilizó Qt Designer, ya que es una herramienta poderosa que permite diseñar y construir interfaces graficas de usuario de manera intuitiva y organizar visualmente elementos, como botones, etiquetas, cuadros de texto, y más, sin necesidad de escribir código, como se muestra en la Figura 2.41. Además, una vez creado el diseño, permite guardar el archivo en formato .ui para cargarlo directamente con el programa en Python, que es lenguaje de programación utilizado en el proyecto.

Figura 2.41. Software Qt designer



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para que el programa en Python pueda cargar directamente el diseño creado en Qt, es indispensable instalar PyQt5, una biblioteca que adapta el framework Qt para su uso en Python. PyQt5 no solo permite interpretar y ejecutar el diseño de la interfaz gráfica, sino que también facilita la gestión de las interacciones del usuario, conecta los componentes de la interfaz con la lógica del programa y permite controlar de manera eficiente el hardware involucrado.

2.8.6.1. MENU PRINCIPAL

El menú principal está diseñado en 2 secciones una fija, que se encarga de visualizar en todo momento los indicadores y aspectos más relevantes del funcionamiento del equipo sin importar el cambio de escena. Por otro lado, se tiene la sección dinámica que va cambiando de escena según la interacción del usuario con las funcionalidades del sistema. Ambas secciones son visualizadas en la Figura 2.42.

Figura 2.42. Secciones de Interfaz gráfica de usuario



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Inicialmente el menú principal presenta acceso limitado, como se muestra en la Figura 2.43. En este estado, el usuario solo puede interactuar con la primera etapa de forma limitada y con el botón de inicio de sesión. Dependiendo del tipo de usuario que inicie sesión (ya sea estudiante, docente o administrativo), se habilitan opciones adicionales, como los botones para el registro de nuevos usuarios y las etapas posteriores.

Figura 2.43. Estado inicial de menú principal



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.6.2. VENTANA DE INICIO DE SESIÓN

En esta ventana se pide el ingreso de datos del usuario, como se muestra en la Figura 2.44, para su validación con la base de datos del sistema, esto para tener un control del uso del equipo.

Figura 2.44. Ventana de inicio de sesión

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Según el tipo de usuario ya sea administrativo, docente o estudiante el sistema permitirá acceso a un distinto nivel de funcionalidad como se describe a continuación:

- **Administrativo:** Acceso total al sistema, con el objetivo de verificar la funcionalidad del equipo y permitir el registro de nuevos usuarios.
- **Docente:** Acceso parcial al sistema, con restricción al registro de nuevos usuarios.
- **Estudiante:** Acceso limitado al sistema, solo funcionalidades básicas de la primera etapa, al requerir la supervisión docente para su uso general.

Además, la ventana incluye un botón para "Cerrar sesión", que revierte el nivel de acceso actual y devuelve el programa a su estado inicial, garantizando la seguridad y el control del sistema.

2.8.6.3. VENTANA DE REGISTRO DE NUEVO USUARIO

La ventana de registro de nuevo usuario, como se muestra en la Figura 2.45, está diseñada para habilitar a nuevos usuarios para el uso del equipo. En esta ventana, se solicita el ingreso de datos personales como nombre de usuario, contraseña y tipo de usuario, los cuales son almacenados en la base de datos del sistema. Estos datos serán utilizados posteriormente para validar el acceso durante el inicio de sesión, garantizando que solo usuarios autorizados puedan interactuar con el equipo de manera segura y controlada.

Figura 2.45. Ventana de registro de nuevo usuario

The screenshot shows a user registration interface. At the top, the window title is 'REGISTRO' and the system clock shows '18:01:07' on '29/03/2025'. The main heading is 'REGISTRO DE USUARIO'. A blue bar at the top left contains a back arrow and the word 'ATRAS'. The registration form includes a 'CUENTA:' field, a 'USUARIO:' dropdown menu currently set to 'ESTUDIANTE', a 'CONTRASEÑA:' field, and a 'CONFIRMAR:' field. A blue 'REGISTRAR' button is centered below the fields. Below the button is a numeric keypad with letters and symbols. At the bottom of the screen, there are three circular icons: a speaker for volume, a camera, and a microphone. The bottom right corner has a small 'Tocú, del' label.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.8.6.4. VENTANAS POR ETAPAS

2.8.6.4.1. VENTANA PRIMERA ETAPA

Esta ventana marca el inicio del proceso de capacitación del estudiante, permite la visualización individual de todos los componentes del sistema, tanto de la autoclave como de la planta de tratamiento de agua. Su objetivo principal es proporcionar una identificación clara y detallada de cada elemento, facilitando su comprensión y uso dentro del sistema.

Para garantizar una identificación clara, cada componente está etiquetado correctamente y, en el caso de los actuadores, se ha implementado un sistema de activación y desactivación individual mediante botones On/Off. Los sensores y componentes pasivos, en cambio, solo cuentan con etiquetas descriptivas.

Además de la identificación, la ventana proporciona información complementaria para cada componente, incluyendo:

- Explicación teórica breve sobre su función y relevancia en el sistema.
- Ilustraciones o animaciones que facilitan la comprensión de su funcionamiento.
- Guía de mantenimiento o verificación, adaptada a la complejidad del componente.

En la Figura 2.46, se muestra un ejemplo de las ventanas de la primera etapa, donde se puede visualizar la distribución y organización de la información.

Figura 2.46. Ejemplo de ventanas de Primera etapa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para reforzar el aprendizaje, los principales componentes incluyen un texto que dirige a actividades de mantenimiento y medición. Estas actividades están documentadas en guías prácticas (ver Apéndice A), donde se detallan los procedimientos específicos que el estudiante debe seguir para la inspección o mantenimiento de cada elemento.

2.8.6.4.2. VENTANA SEGUNDA ETAPA

La ventana de la Segunda Etapa tiene como objetivo proporcionar al estudiante una visión detallada y dinámica del funcionamiento interno de la autoclave. Para ello, se emplea un diagrama sinóptico animado, acompañado de textos explicativos que guían al usuario a lo largo de cada fase del proceso de esterilización en tiempo real.

Esta etapa permite que el estudiante relacione los componentes estudiados en la Primera Etapa con su aplicación práctica dentro del sistema, comprendiendo cómo interactúan entre sí durante la operación de la autoclave. En la Figura 2.47, se muestra la interfaz correspondiente a esta etapa.

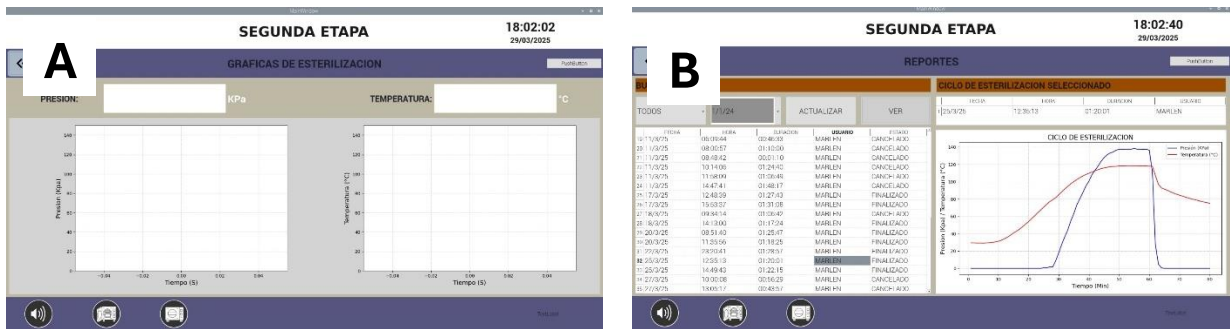
Figura 2.47. Ventana segunda etapa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En el lateral de la ventana se encuentran botones de acceso rápido para el ingreso de agua a la cámara, el inicio del ciclo de esterilización, la visualización de gráficas en tiempo real de temperatura y presión (ver Figura 2.48 A), la generación de reportes con registros de ciclos finalizados o cancelados obtenidos desde la base de datos del sistema (ver Figura 2.48 B), lo que permite llevar un control de los procesos realizados y analizar posteriormente las gráficas de presión y temperatura. También se incluye un botón para la cancelación del ciclo en caso de detectar una falla o si es necesario detener el proceso.

Figura 2.48. Ventanas de botones de gráfica y reportes.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En el diseño también se incorporó un botón de alarmas (ver Figura 2.47), que al presionarse despliega una tabla con el listado de fallas detectadas hasta el momento, con su respectivo número de ciclo, hora y fecha (ver Figura 2.49). Además, este botón cambia de color a rojo intermitente en caso de que se detecte una anomalía crítica, como presión elevada o insuficiente y fallos en sensores de nivel de agua. Estas alertas visuales van acompañadas de una señal audible activada mediante un buzzer instalado en el tablero de control, con el objetivo de advertir al usuario sobre posibles riesgos.

Figura 2.49. Ventana de fallas

SEGUNDA ETAPA 17:34:11 31/05/2025
ALARMAS

ID	Nº	HORA	FECHA	DESCRIPCION
1	47	00:33:23	09/04/2025	Fallo presión elevada
2	47	23:05:12	08/04/2025	Fallo presión elevada
3	47	16:27:26	08/04/2025	Fallo presión elevada
4	42	12:55:02	28/03/2025	Fallo presión elevada
5	42	16:26:07	27/03/2025	Fallo presión elevada
6	40	09:56:24	27/03/2025	Fallo presión elevada
7	38	16:13:35	25/03/2025	Fallo presión baja
8	38	09:35:16	25/03/2025	Fallo presión elevada
9	7	20:20:09	20/01/2025	Fallo presión elevada
10	6	10:05:39	7/27/24	Fallo presión elevada
11	6	18:37:14	7/12/24	Fallo presión elevada
12	6	18:36:49	7/12/24	Fallo sensor de nivel de agua

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para finalizar el lado derecho de la ventana se muestra información en tiempo real sobre la etapa actual del proceso de esterilización, el tiempo transcurrido desde el inicio del

ciclo, una descripción breve de lo que ocurre en cada fase y los valores objetivo de presión y temperatura necesarios para completar cada paso y garantizar una esterilización efectiva. La interfaz ha sido diseñada para proporcionar una experiencia intuitiva y eficiente, permitiendo un monitoreo preciso del proceso y una rápida reacción ante cualquier eventualidad.

2.8.6.4.3. VENTANA TERCERA ETAPA

Esta ventana tiene como simular de manera interactiva las etapas del proceso de tratamiento de agua para autoclaves a vapor, desde la entrada de agua municipal hasta la obtención de agua tratada, integrando conceptos teóricos con una experiencia visual, didáctica y práctica al contar en el proyecto con una pequeña planta de tratamiento de agua física.

Para su desarrollo, se consideraron las características más relevantes y comúnmente utilizadas en plantas de tratamiento de agua destinadas a autoclaves a vapor. La interfaz esquematiza las principales etapas de filtrado, incluyendo la captación y bombeo del agua desde un tanque de almacenamiento, su paso por un filtro de sedimentos, luego por un filtro de carbón activado, posteriormente por un ablandador y finalmente por un sistema de ósmosis inversa, garantizando así la obtención de agua con la calidad requerida para su uso en procesos de esterilización (ver Figura 2.50).

Figura 2.50. Ventana tercera etapa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La navegación dentro de esta ventana es interactiva, permitiendo al usuario desplazarse entre las distintas etapas del tratamiento mediante botones de avance y retroceso. Al seleccionar una etapa, el sistema muestra imágenes descriptivas junto con información clave sobre su función y objetivos, alineado con las recomendaciones establecidas en la norma EN285 y AAMI ST79, la cuales definen los estándares de calidad que debe cumplir el agua utilizada en una central de esterilización, proporcionando así una comprensión integral del proceso y su importancia en la correcta operación de las autoclaves.

2.8.6.4.4. VENTANA CUARTA ETAPA

Esta etapa representa la fase final de la herramienta educativa y está diseñada para reforzar el aprendizaje a través de la resolución de fallas en autoclaves. En la Figura 2.51 se muestra la interfaz de esta ventana, donde el usuario puede navegar entre diferentes escenarios de error utilizando las flechas de navegación.

El estudiante deberá analizar y diagnosticar la causa de cada fallo siguiendo una serie de comprobaciones y pruebas predefinidas, las cuales se basan en protocolos de mantenimiento utilizados en autoclaves comerciales de características similares. A medida que avanza en el proceso, podrá marcar las actividades completadas hasta resolver completamente todas las actividades.

Figura 2.51. Ventana cuarta etapa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Esta metodología permite que el usuario aplique los conocimientos adquiridos en las etapas anteriores, desarrollando habilidades prácticas en la identificación y solución de errores comunes en autoclaves, lo que refuerza su capacidad para enfrentar situaciones reales en el mantenimiento de estos equipos.

2.8.7. DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS

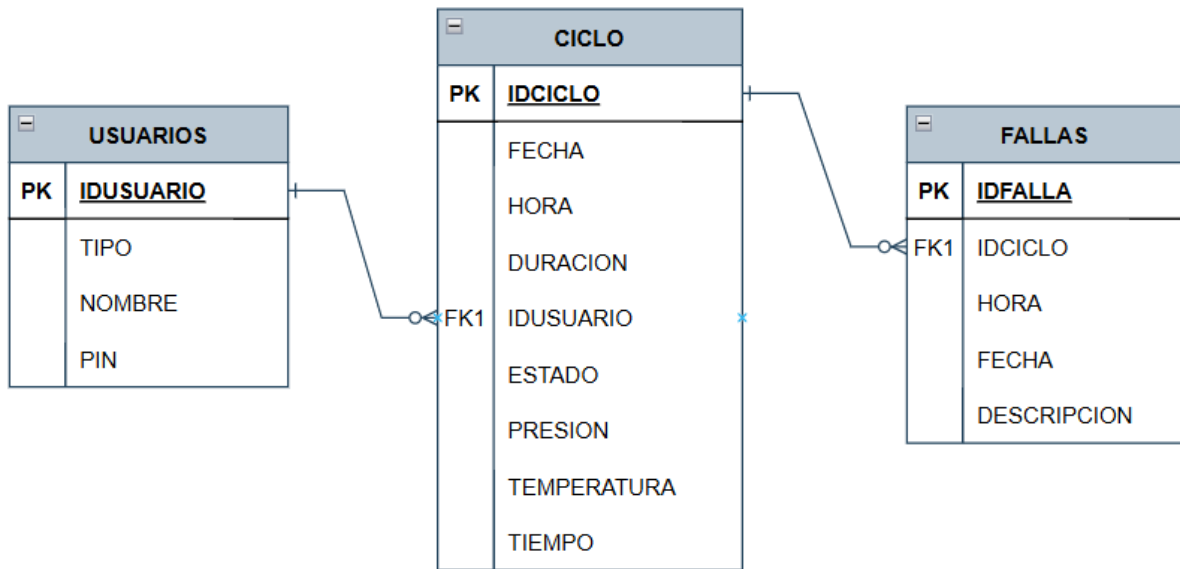
Para la implementación de la base de datos del sistema, se consideró que el funcionamiento sería completamente local, por lo que se optó por SQLite. Esta base de datos es liviana, no requiere un servidor y almacena toda la información en un único archivo, lo que la hace ideal para aplicaciones embebidas, como en la Raspberry Pi. Además, SQLite está integrado en Python a través del módulo `sqlite3`, lo que facilita su implementación y gestión dentro del sistema.

Para la creación, gestión y edición de la base de datos, se utilizó DB Browser for SQLite, una herramienta visual que facilita la administración de bases de datos SQLite. Esta aplicación permitió la ejecución de consultas SQL, la modificación en vivo de registros y la validación de la estructura de las tablas de forma intuitiva, asegurando así su correcto funcionamiento y adecuada gestión de la información del sistema.

El diseño de la base de datos se enfocó en organizar de manera estructurada los datos provenientes de los sensores, los registros de eventos y usuarios. Para ello, se definieron tablas optimizadas que permiten almacenar mediciones, así como consultas eficientes para el análisis posterior.

En la Figura 2.52, se muestra el modelo relacional de la base de datos, compuesto por tres tablas principales:

Figura 2.52. Diagrama relacional de la base de datos



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Las relaciones establecidas en este modelo aseguran la coherencia de los datos y permiten un seguimiento detallado de los ciclos, los usuarios involucrados y los fallos registrados.

1. USUARIOS

- Contiene la información de los usuarios que interactúan con el sistema.
- Su clave primaria es IDUSUARIO, que identifica de manera única a cada usuario.
- Almacena atributos como TIPO (rol del usuario), NOMBRE y PIN (código de acceso).

2. CICLO

- Registra los ciclos operativos del sistema, almacenando datos como la fecha, hora, duración, estado, presión, temperatura y tiempo del ciclo.
- Su clave primaria es IDCICLO, que identifica cada ciclo de manera única.
- Posee una clave foránea (IDUSUARIO), que establece una relación con la tabla USUARIOS, indicando qué usuario inició el ciclo.

3. FALLAS

- Almacena información sobre los fallos detectados durante la operación del sistema.
- Su clave primaria es IDFALLA, que identifica cada fallo de manera única.
- Incluye atributos como la fecha, hora y una descripción del evento.
- Contiene una clave foránea (IDCICLO), que la relaciona con la tabla CICLO, permitiendo registrar a qué ciclo pertenece cada falla.

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y RESULTADOS

CAPÍTULO III PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1. IMPLEMENTACION DEL EQUIPO

En la Figura 3.1 se muestra el equipo final con todas las características diseñadas anteriormente, en la que se puede evidenciar el rediseño estructural, la optimización del circuito de tuberías, el montaje del tablero de control y la incorporación de un interruptor ON-OFF junto con un sistema de parada de emergencia para garantizar la acción rápida del usuario ante cualquier eventualidad.

Figura 3.1. Desarrollo final del proyecto



Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Con todo el equipo montado y con las pruebas correspondiente de los componentes y del sistema de control funcionando se procedieron a realizar pruebas de funcionamiento que son cruciales para detectar fallas y realizar ajustes finales que garanticen un correcto funcionamiento.

Durante estas pruebas, se identificaron fugas de vapor en conexiones de tuberías a presiones superiores a 90 kPa manométrica, lo que impedía alcanzar eficientemente la presión de trabajo. Para solucionar este problema, tras varios ajustes y pruebas se reemplazó el sistema de conexión por conos de compresión con un sistema avellanado, logrando eliminar completamente las fugas y mejorando la hermeticidad.

- **Ajustes en el sistema de control**

El sistema de control fue sometido a una serie de pruebas cuyos resultados fueron analizados y ajustados para optimizar su desempeño. El objetivo principal fue garantizar la correcta generación de vapor saturado dentro de la cámara, asegurando el cumplimiento de la relación temperatura-presión, (Ver anexo 2) establecida en normativas de esterilización.

En las primeras pruebas, los resultados mostraron que la presión dentro de la cámara fue más alta de lo esperado, superando los 130 kPa, seguida de una caída gradual durante la fase de esterilización. También se notó que la eliminación del aire no fue lo suficientemente eficaz para equilibrar la presión y la temperatura dentro de la cámara. Esto se vio reflejado en la presión que alcanzó niveles de 138 kPa, mientras que la temperatura solo alcanzó los 118 °C. Esto sugiere que el vapor no se distribuyó de manera uniforme dentro de la cámara, lo que afectó el proceso de esterilización.

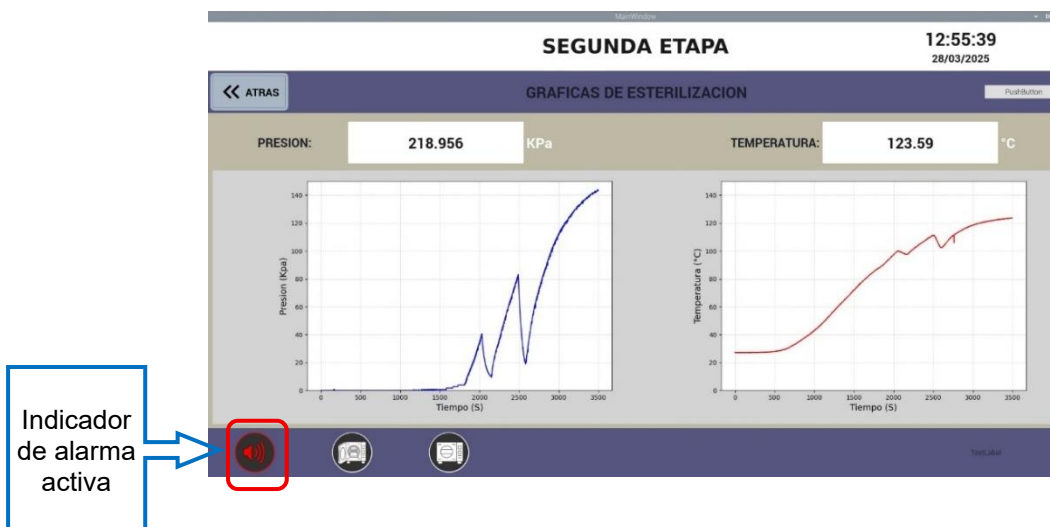
Figura 3.2. Gráfica de pruebas iniciales



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para lograr una correcta homogenización, se aplicaron técnicas de remoción de aire, las cuales, en este tipo de autoclave, consiste en la eliminación de aire de la cámara mediante vapor pulsado (ver Figura 3.3), Este proceso permite una distribución uniforme de la temperatura.

Figura 3.3. Remoción de aire por vapor pulsado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Aunque se logró una distribución uniforme de la temperatura, cumpliendo con la relación entre presión y temperatura, se observó que durante la etapa de calentamiento la presión se elevó demasiado, superando ampliamente el valor objetivo. Esto provocó la activación de la alarma de presión elevada, como se puede ver en la Figura 3.3.

Para corregir la presión elevada, se realizaron ajustes en el control PWM con el fin de obtener una onda más suave durante el periodo de calentamiento, permitiendo alcanzar gradualmente la presión objetivo. Tras realizar varias pruebas, los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 3.4.

Figura 3.4. Grafica con corrección de presión elevada



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para finalizar y corregir la caída de presión al final de la etapa de esterilización, como se observa en la Figura 3.4, se determinó el porcentaje exacto del ciclo de trabajo del PWM en el que la presión logra estabilizarse y mantenerse de manera lineal a lo largo del tiempo. En la figura 3.5 se muestran los resultados de las pruebas finales, en las cuales se lograron los resultados óptimos, garantizando una relación adecuada entre temperatura y presión. Esto permitió obtener una meseta estable en la etapa de esterilización, asegurando que la temperatura se mantuviera a 121°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), conforme a las recomendaciones de la norma EN 13060.

Figura 3.5. Grafica final del ciclo de esterilización.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.2. VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

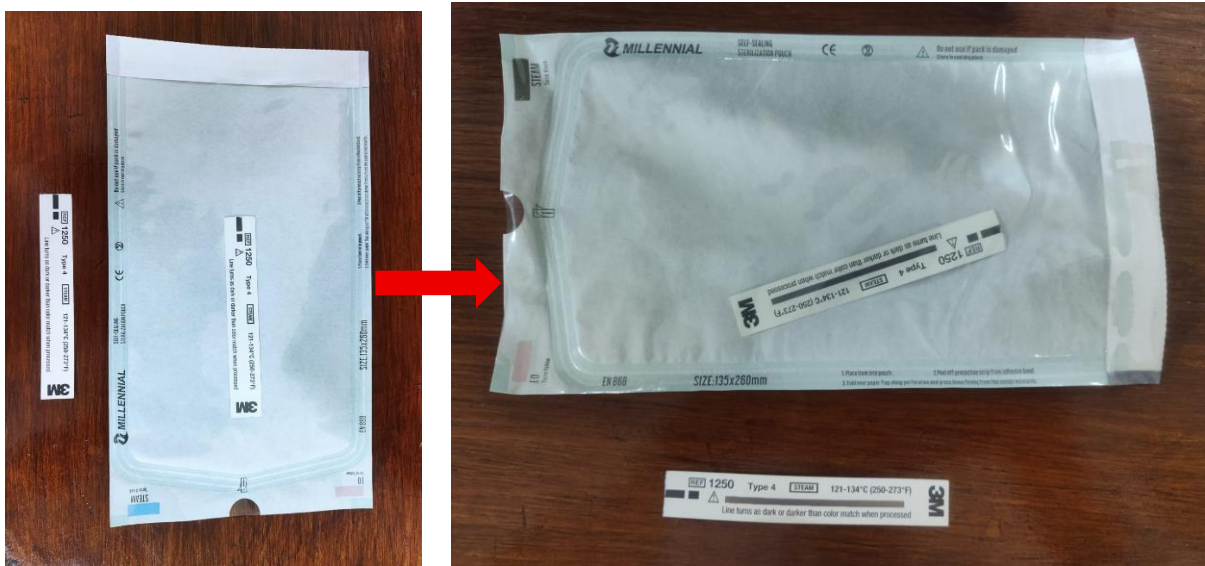
Para comprobar el correcto funcionamiento de la autoclave y su sistema de control desarrollado, se realizó pruebas utilizando indicadores químicos de clase 4. Estos indicadores están diseñados para reaccionar a múltiples variables críticas del proceso de esterilización, como el tiempo de exposición, la presencia de vapor saturado y la temperatura alcanzada en la cámara.

Durante las pruebas, los indicadores fueron colocados estratégicamente en diferentes puntos dentro de la cámara de esterilización. Tras los ciclos completados, se observó el cambio de color predefinido en el indicador, lo que indica que se cumplieron correctamente las condiciones necesarias para una esterilización efectiva.

Los resultados se presentan en la Figura 3.6, donde se evidencia visualmente el cambio de color de los indicadores, validando así la eficiencia del sistema térmico y de presión

de la autoclave, así como la precisión del sistema de control electrónico, que regula y mantiene los parámetros críticos del proceso.

Figura 3.6. Viraje de indicador químico clase 4.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.3. FUNCIONAMIENTO COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA

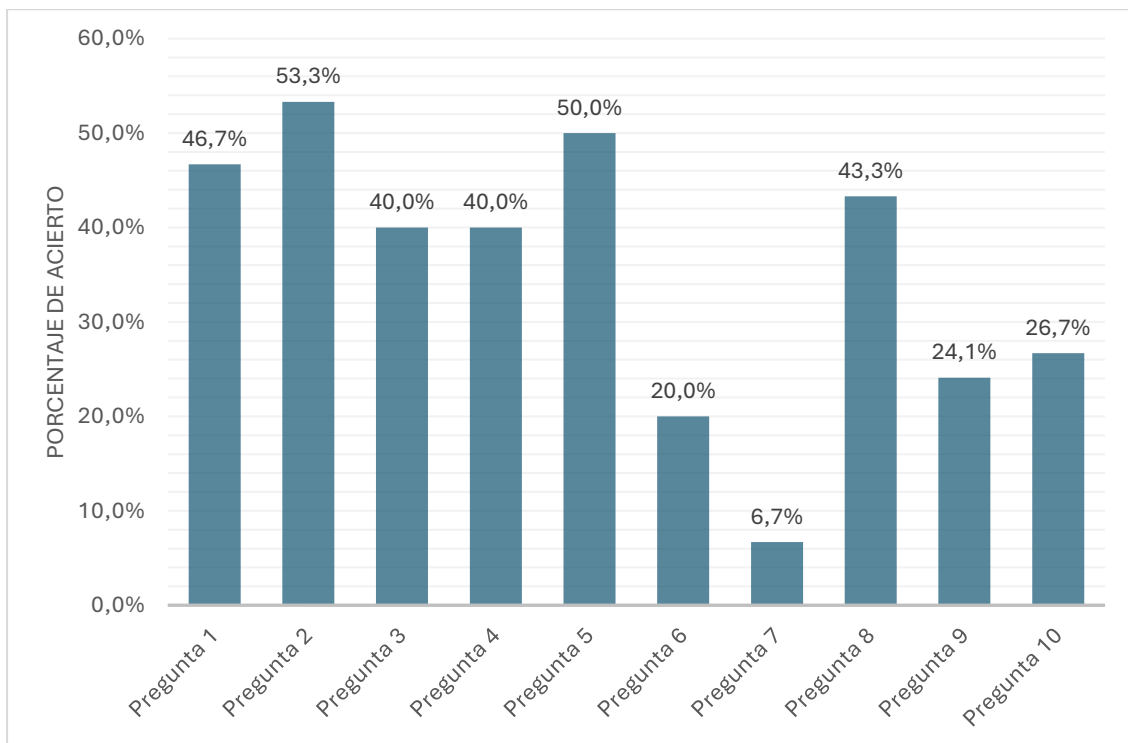
Con el objetivo de validar la utilidad del equipo desarrollado como herramienta educativa, se diseñó y aplicó una encuesta diagnóstica a un grupo de 30 estudiantes del séptimo semestre de la carrera de Ingeniería Biomédica. Los encuestados cursaron la asignatura de Instrumentación Médica II, la cual aborda el estudio de diversos equipos médicos, entre ellos el esterilizador a vapor y plantas de tratamiento de agua.

La encuesta consistió en 10 preguntas (Ver apéndice B) enfocadas en conceptos clave relacionados con el funcionamiento, la seguridad y los principios de la esterilización por vapor, así como aspectos importantes relacionados con el proceso de tratamiento de agua para autoclaves. Esta prueba diagnóstica tuvo como finalidad evaluar el estado inicial de conocimientos adquiridos únicamente a través del enfoque tradicional de

enseñanza, es decir, sin el uso de una herramienta didáctica práctica como la desarrollada en este proyecto.

Las respuestas fueron tabuladas y representadas gráficamente en una gráfica de barras, como se puede ver en la Figura 3.7, que muestra el porcentaje de aciertos por pregunta, facilitando el análisis del nivel de comprensión general y específica de los temas evaluados. Esta información sirve como línea base para comparar posteriormente el impacto del uso del equipo educativo.

Figura 3.7. Gráfica de barras del porcentaje de aciertos por pregunta.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de los resultados muestra que el 64,9% de las respuestas totales fueron incorrectas, lo que equivale a decir que 7 de cada 10 respuestas estaban mal. Este cálculo se obtuvo sumando los porcentajes de error de cada pregunta y dividiéndolo entre el número total de preguntas:

1. Suma total de errores en todas las preguntas:

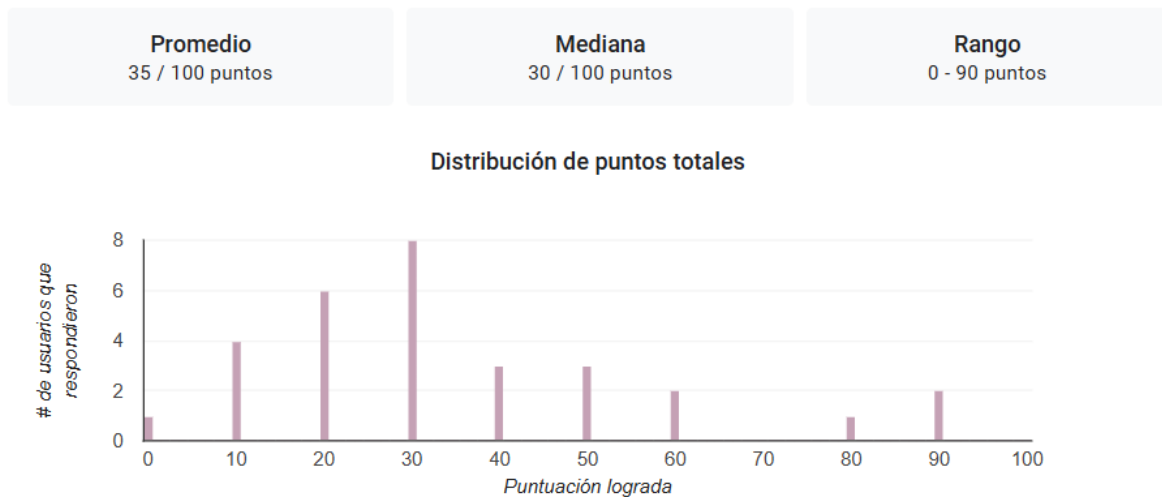
$$(53.3 + 46.7 + 60 + 60 + 50 + 80 + 93.3 + 56.7 + 75.9 + 73.3) = 649.2\%$$

2. Promedio de errores:

649.2% total de errores / 10 preguntas = 64.9%

El análisis de la evaluación, en la que cada una de las 10 preguntas tenía un valor de 10 puntos, alcanzando un puntaje máximo posible de 100 puntos, revela que el desempeño promedio obtenido por los estudiantes fue de 35 sobre 100 puntos, lo que evidencia un bajo nivel de dominio en los temas evaluados. Estos resultados se representan gráficamente en la Figura 3.8

Figura 3.8. Gráfica distribución de puntos totales.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Estos resultados reflejan la necesidad de reforzar el proceso de enseñanza-aprendizaje. En este sentido, la herramienta didáctica propuesta cobra especial relevancia, ya que los estudiantes se encuentran en la etapa final de su formación profesional y es fundamental que cuenten con una comprensión clara y sólida del principio de funcionamiento de los equipos médicos.

Con el objetivo de validar la efectividad de la herramienta desarrollada como recurso didáctico, se organizó una clase práctica dirigida a un grupo de 10 estudiantes que cursaron la materia de Instrumentación médica II, utilizando el sistema automatizado de control de autoclave diseñado en este proyecto. Esta sesión se estructuró conforme a la

secuencia educativa del proyecto, se realizó la identificación y mantenimiento de componentes, demostración animada del proceso de esterilización, seguimiento del sistema de tratamiento de agua y diagnóstico de fallas comunes. La actividad permitió a los estudiantes interactuar directamente con la herramienta, observar su funcionamiento interno y participar en los procedimientos operativos bajo supervisión. Como se muestra en la Figura 3.9.

Figura 3.9. Participación de estudiantes en la clase con el uso de la herramienta didáctica.

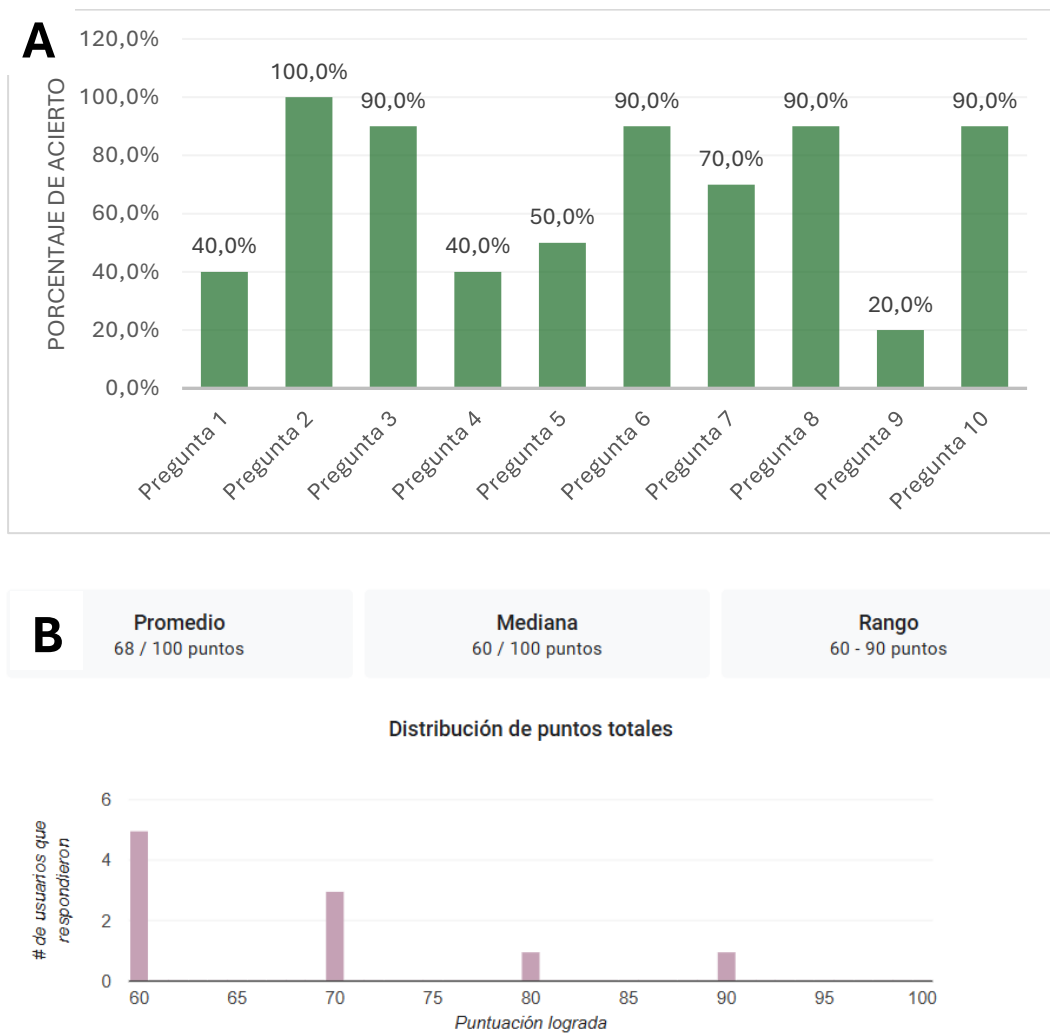


Fuente: Archivo fotográfico personal, 2025.

Al concluir la capacitación, se aplicó una nueva encuesta diagnóstica (Ver apéndice C), para evaluar el nivel de conocimientos alcanzado tras la experiencia didáctica. Los resultados de esta segunda medición evidenciaron una mejora significativa en el desempeño general.

En la Figura 3.10 A, se muestra el porcentaje de aciertos por pregunta, donde se observa un mayor porcentaje de respuestas correctas en cada una de las preguntas en comparación con la evaluación inicial. Y en la Figura 3.10 B se muestra la distribución de puntos totales y el promedio alcanzado de los estudiantes.

Figura 3.10. Graficas de resultados obtenidos posterior al uso de la herramienta didáctica.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de los resultados muestra que solo el 32% de las respuestas totales fueron incorrectas y el puntaje promedio obtenido fue de 68/100 puntos, lo que representa un incremento de 33 puntos en relación con la evaluación inicial (35/100 puntos).

Este resultado refleja una mejora del 94,3% en el desempeño promedio de los estudiantes, demostrando que el uso de la herramienta didáctica permitió fortalecer su comprensión teórica y práctica de los conceptos evaluados. Además, se observó un incremento en la cantidad de respuestas correctas en todas las preguntas,

Este aumento evidencia la efectividad de la herramienta como recurso didáctico, permitiendo a los estudiantes reforzar conceptos teóricos y comprender de forma práctica los principios de funcionamiento, seguridad y mantenimiento de autoclaves a vapor y sistemas de tratamiento de agua.

3.4. COSTOS UTILIZADOS

Para el desarrollo del proyecto se contó con la financiación de la Universidad Privada del valle quien fue la encargada de la adquisición de gran parte de componentes y materiales requeridos para el proyecto con la finalidad de su implementación en la institución.

El análisis de los costos es fundamental para la planificación y ejecución de cualquier proyecto. A continuación, se detallan los gastos asociados con el desarrollo e implementación de este proyecto. La tabla 3.1 presenta los costos distribuidos por áreas específicas del proyecto, incluyendo: componentes y materiales electrónicos para el sistema de control de la autoclave, materiales para el rediseño estructural del equipo, y el costo de la planta de tratamiento de agua, cuya integración es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 3.1. Costos utilizados en el proyecto.

Cantidad	Unidad	DESCRIPCIÓN	P/U Estimada	VALOR TOTAL
AUTOCLAVE SISTEMA DE CONTROL				
1	Pza.	Raspberry pi 4 B (8 GB)	1.633,00	1.633,00
1	Pza.	Cargador original de raspberry pi 4	61,00	61,00
1	Pza.	Memoria SD 64 GB, Clase 10	163,00	163,00
1	Pza.	Cable adaptador Micro HDMI a HDMI	95,00	95,00
1	Pza.	Cable HDMI, 2 mtrs.	82,00	82,00
1	Pza.	Cable USB a MicroUSB, 2 mtrs.	102,00	102,00
1	Pza.	Pantalla LCD touch ,10 pulgadas	1.056,00	1.056,00
1	Pza.	Fuente de alimentación conmutada 5V -3A	70,00	70,00
3	Pza.	Pasta térmica tipo jeringa 30 GR, Blanco	18,00	54,00
1	Pza.	Estaño para soldar Bera 0,8 mm, 250 G	185,00	185,00
1	Pza.	Pasta para soldar 50 GR.	19,00	19,00
1	Pza.	TLP281-4	33,00	33,00
1	Pza.	Circuito integrado ULN2003	5,00	5,00
12	Pza.	Borneras de 2 pines, 5 mm	2,50	30,00
1	Pza.	Cable GPIO de 40 pines, Raspberry pi	30,00	30,00
1	Pza.	MCP3008 - Conversor ADC 10bits	55,00	55,00
3	Pza.	Tira de pines macho (espadín macho, 40 pines)	6,00	18,00
1	Pza.	PCB Virgen 20*30cm 1layer (fibra de vidrio)	81,00	81,00
1	Pza.	BTA26 Triac	33,00	33,00
1	Pza.	BTA16 Triac	12,00	12,00
3	Pza.	Bornera de 2 pines, 9,5 mm, con tapa	6,00	18,00
2	Pza.	MOC3021 Optoacoplador	4,00	8,00

2	Pza.	Flotadores de nivel de líquidos, horizontal	35,00	70,00
1	Pza.	MAX31865 Modulo conversor de temperatura	100,00	100,00
1	Pza.	Modulo relay de estado solido- 4 canales	87,00	87,00
45	Pza.	Borneras Industriales 2,5 mm2, para Riel Din	3,60	162,00
8	Pza.	Borneras Industriales con Portafusible 4 mm2, para Riel Din	28,75	230,00
6	Mt	Cables multifilar 2,5 mm2 Rojo, por metro	4,00	24,00
6	Mt	Cables multifilar 2,5 mm2 Azul, por metro	4,00	24,00
8	Mt	Cables multifilar 1 mm2 Azul, por metro	3,00	24,00
8	Mt	Cables multifilar 1 mm2 Rojo, por metro	3,00	24,00
8	Mt	Cables multifilar 1,5 mm2 Azul, por metro	2,00	16,00
8	Mt	Cables multifilar 1,5 mm2 Rojo, por metro	2,00	16,00
1	Pza.	MPX5500 Sensor de presión diferencial 0-500 KPa	232,00	232,00
1	Pza.	Pt100 Sensor de temperatura - 3 hilos	123,00	123,00
1	Pza.	válvula de alivio, rosca 3/4, regulación 0-10 bar.	400,00	400,00
2	Pza.	Electroválvula a solenoide de 2 vías 220V, rosca 1/2	696,00	1.392,00
1	Pza.	Contactador de 9A de bobina 220VAC	182,00	182,00
1	Pza.	Guardamotor 1,6- 2,5A	270,00	270,00
1	Pza.	Termomagnético bipolar - 25A	70,00	70,00
1	Pza.	relé diferencial bipolar - 25A	230,00	230,00
1	Pza.	Ventilador Industrial BEM-8025HBL, Voltaje 220-240VAC/0.1A, Tamaño 80*80*25 mm	115,00	115,00
1	Pza.	Disipador de aluminio BEM-W70, para relé de estado solido	63,00	63,00
2	Pza.	Cable canal ranurado- barra de 2mts	40,00	80,00
1	Pza.	Riel DIN -barra 2 mtrs	18,00	18,00
AUTOCLAVE ACONDICIONAMIENTO ESTRUCTURAL				

1	Barra	Angular Acero 1 PLG.	128,00	128,00
1	Barra	Pletina Acero 1 PLG.	82,00	82,00
1	Pza	Electrodo	41,00	41,00
5	Pza.	Disco de corte	3,00	15,00
100	Pza.	Remaches	0,20	20,00
2	Pza.	Broca acobaltada 5mm	35,00	70,00
1	Mt	Bisagra piano	35,00	35,00
1	Pza.	Brazo neumático	35,00	35,00
2	Pza.	Manija de aluminio	10,00	20,00
1	Barra	Riel de aluminio	58,00	58,00
1	Pza.	Seguro riel	41,00	41,00
2	Pza.	Seguro tipo pispote	4,00	8,00
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA				
1	Pza.	Osmosis, modelo WPS, producción de 100 galones por día.	11.370,00	11.370,00
1	Pza.	Ablandador FRP 8x24 automático RUNXIN R/volumen 1" A-824-ARV		
1	Pza.	Prefiltro 10x2,5 + filtro 10,2,5 de 1 micron		
1	Pza.	Bomba de agua 1/2 HP + Cabezal tipo presostato, automático		
1	Pza.	Estructura metálica para instalación de componentes		
1	Pza.	Tablero de control.		
Son:	(Diecinueve mil setecientos dieciocho con 00/100 Bolivianos)			19.718,00
				Monto TOTAL

Fuente: Elaboración propia, 2025.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se logró recopilar, analizar y aplicar exitosamente normativas internacionales relacionadas con la esterilización por vapor, tales como la EN 13060, EN 285 y la AAMI ST-79. Esta investigación permitió establecer criterios técnicos sólidos para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema. En base a estas normativas, se definieron los parámetros críticos del ciclo de esterilización, como la temperatura de 121 °C y presión de 1.3 bar durante 15 minutos, fundamentales para asegurar la eliminación de microorganismos. Este conocimiento fue esencial no solo para el desarrollo técnico del sistema, sino también como contenido didáctico integrado en la interfaz educativa, brindando a los estudiantes fundamentos normativos clave.
- Se realizó un diagnóstico técnico del estado del equipo Pelton & Crane modelo MC, identificando componentes útiles y partes obsoletas. Se conservaron elementos como la cámara de esterilización, resistencias eléctricas y ciertos elementos estructurales, lo cual optimizó el presupuesto total del proyecto. Las resistencias se encontraban dentro del rango funcional (27.54 Ω parte superior y 19.04 Ω parte inferior, con un consumo total de 19.5 A), pero se procedió a su limpieza y reacondicionamiento. Se reemplazaron sensores, electroválvulas y el sistema de tuberías, eliminando fugas y rediseñando el flujo del circuito para su mayor comprensión. Esta etapa permitió recuperar funcionalmente un equipo que antes estaba en desuso, aportando valor tangible a la universidad.
- Se diseñó un sistema de control moderno con componentes seleccionados cuidadosamente. Se optó por una Raspberry Pi 4 B como unidad principal de procesamiento, permitiendo desarrollar una arquitectura abierta, flexible y de fácil acceso para los estudiantes. Se integraron sensores PT100 de tres hilos (para mayor precisión en temperatura) y el sensor de presión MPX5500DP, acompañado de un conversor analógico-digital MCP3008 para lectura precisa de señales. Se incluyeron relés de estado sólido (SSR) y un sistema de protección

contra sobrecorrientes, mejorando la seguridad operativa. Este sistema permitió una lectura y control confiable en tiempo real de los parámetros críticos del proceso.

- Se desarrolló una planta de tratamiento de agua demostrativa y funcional, compuesta por un prefiltro de sedimentos, ablandador automático modelo FCV0915F, sistema de ósmosis inversa de 50 GPD y un sistema de control por boya de nivel conectado al reservorio de la autoclave. Esta configuración permite garantizar la calidad del agua de entrada para evitar incrustaciones en la cámara de esterilización y tuberías, lo que asegura una esterilización efectiva y prolongar la vida útil del equipo. Además, su diseño modular y accesible del sistema no solo facilita su comprensión teórica, sino que también promueve la participación de los estudiantes en actividades prácticas. Estos pueden realizar tareas de verificación y mantenimiento de los componentes. De este modo, la planta se convierte en una herramienta pedagógica complementaria que fortalece el aprendizaje en temas de tratamiento de agua que va de la mano de un esterilizador a vapor.
- Se diseñaron e integraron circuitos electrónicos específicos para la adquisición de señales de presión y temperatura, y para el control de resistencias y electroválvulas mediante relés de estado sólido. Se aplicó control por modulación por ancho de pulso (PWM) para regular los tiempos de encendido de las resistencias, diferenciando las fases de calentamiento y mantenimiento. El sistema logró mantener los parámetros críticos de temperatura $121^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, presión manométrica $130 \text{ kPa} \pm 7 \text{ kPa}$ y un tiempo de exposición de 15 minutos, lo cual fue validado en múltiples pruebas. Este desarrollo constituye un aporte técnico relevante al integrar electrónica, control digital y programación aplicada en un entorno biomédico.

- Se diseñó una interfaz educativa modular mediante Qt Designer, con un enfoque didáctico dividido en etapas. Incluye animaciones, esquemas del sistema, monitoreo en tiempo real y ventanas de control por usuario. La interfaz permite al estudiante visualizar en detalle las variables del sistema, recibir alertas de fallas y seguir el ciclo de esterilización paso a paso. Se implementaron ventanas específicas para el tratamiento de agua y registros históricos mediante base de datos SQLite. Esta interfaz no solo guía al usuario en el proceso, sino que se convierte en una herramienta de aprendizaje interactivo, alineada con los principios modernos de educación en ingeniería.
- La integración de los subsistemas permitió montar un equipo funcional, seguro y didáctico. Se incorporó un tablero de control con distribución clara de componentes, botón de paro de emergencia, cableado ordenado y etiquetado. Las pruebas demostraron un funcionamiento estable, alcanzando temperaturas y presiones de esterilización con variaciones mínimas. La validación del ciclo con indicadores químicos clase 4 mostró un viraje exitoso, confirmando la eficacia del proceso.
- Las pruebas de validación técnica confirmaron que el sistema cumple adecuadamente con los parámetros establecidos para procesos de esterilización, alcanzando 121 °C y 1.3 bar durante 15 minutos, verificados mediante indicadores químicos de clase 4. Además, se respetó el margen permisible de ± 1 °C indicado en la norma EN 13060 para autoclaves de pequeño porte, garantizando así que las variaciones de temperatura se mantuvieran dentro de los límites aceptados para ciclos efectivos. La implementación de algoritmos de control por modulación de ancho de pulso (PWM) y rutinas de filtrado de señales permitió mantener la estabilidad y precisión de los ciclos, asegurando condiciones seguras y confiables tanto para fines académicos como de laboratorio.

- El impacto académico de la herramienta didáctica propuesta se evidenció a través de una evaluación comparativa aplicada antes y después de su implementación. Inicialmente, los estudiantes obtuvieron un promedio de 35 puntos sobre 100 en la prueba diagnóstica, mientras que tras la capacitación utilizando el sistema, el promedio se elevó a 68 puntos. Esto representa una mejora relativa del 94.3% en el desempeño, calculada en función del incremento porcentual respecto al puntaje inicial. Estos resultados confirman la eficacia de la herramienta para fortalecer tanto los conocimientos teóricos como la comprensión práctica sobre el funcionamiento y mantenimiento de equipos de esterilización, validando su utilidad como recurso formativo en el área biomédica.
- El proyecto cumplió satisfactoriamente con el objetivo general, al implementar un sistema de control automatizado y una interfaz educativa para una autoclave previamente obsoleta, complementado con una planta de tratamiento de agua funcional. Esta herramienta permite a los estudiantes desarrollar habilidades prácticas en esterilización, control de calidad del agua y operación de sistemas biomédicos, todo dentro de un entorno seguro y guiado. Esta experiencia acorta la brecha de la enseñanza teórica convencional con la formación técnica aplicada y preparando mejor a los futuros profesionales para entornos clínicos y hospitalarios.

Desde el rol del estudiante, se integraron conocimientos en electrónica, control, programación, diseño gráfico y normativas técnicas, culminando en un sistema educativo completo y replicable. El desarrollo de este proyecto no solo representa un aporte significativo a la formación de nuevos profesionales, sino que también propone una solución innovadora a la necesidad de enseñanza práctica en ingeniería biomédica.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar talleres de capacitación dirigidos tanto a docentes como a estudiantes, enfocados en el manejo, operación segura y mantenimiento preventivo del equipo. Estas sesiones permitirán maximizar el aprovechamiento de la herramienta didáctica, garantizar su uso adecuado y promover buenas prácticas en la gestión de equipos biomédicos dentro del entorno académico.
- Se recomienda llevar a cabo un mantenimiento preventivo periódico del sistema, enfocándose en la revisión de componentes clave como sensores, resistencias, conexiones eléctricas, electroválvulas y dispositivos de seguridad. Además, es fundamental realizar inspecciones regulares al sistema de tratamiento de agua para prevenir la acumulación de minerales, lo que contribuirá a la longevidad de la cámara de esterilización y garantizará un funcionamiento óptimo del equipo a largo plazo.
- Como proyección de mejora y con el objetivo de ampliar los conocimientos prácticos y teóricos de los estudiantes, se propone la implementación de un sistema de generación de vapor externo, que permitirá no solo optimizar los tiempos de calentamiento, sino también brindar a los estudiantes la oportunidad de conocer y operar un sistema complementario de mayor eficiencia energética. Asimismo, se sugiere incorporar un sistema de vacío, lo cual facilitará la eliminación del aire residual de la cámara antes del inicio del ciclo, mejorando la penetración del vapor y asegurando una esterilización más homogénea, acorde a los estándares de equipos de mayor complejidad. Esto permitirá a los estudiantes familiarizarse con tecnologías presentes en autoclaves de gama alta y de gran capacidad, ampliando su formación y preparación para entornos hospitalarios y biomédicos profesionales.
- Se propone adaptar y replicar el sistema de control y la metodología didáctica desarrollada en este proyecto para su aplicación en otros equipos médicos, como incubadoras, equipos de hemodiálisis, ventiladores. Esta expansión permitirá

estandarizar prácticas de aprendizaje cerrando la brecha entre teoría y práctica, incrementando el impacto académico al ofrecer a los estudiantes la posibilidad de interactuar con diferentes tecnologías biomédicas bajo un enfoque práctico, seguro y didáctico.

- Se propone incorporar conectividad IoT para el monitoreo remoto y almacenamiento en la nube de los ciclos de esterilización. Esto permitiría no solo mejorar la trazabilidad del equipo, sino también brindar capacitación y supervisión a distancia, ampliando las oportunidades de educación continua y aprendizaje virtual para estudiantes y docentes.

BIBLIOGRAFIA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta y Andrade, (2008) <https://www.paho.org/es/documentos/manual-esterilizacion-para-centros-salud-2008>

Alvarez, (2018). Controles o indicadores químicos del proceso de esterilización. Recuperado de: <https://elautoclave.wordpress.com/>

Areny, R. P. (2004). Sensores y acondicionadores de señal. Marcombo. Recuperado de: https://books.google.com.bo/books?hl=es&lr=&id=Eevyk28_fVkC&oi=fnd&pg=PR11&dq=que+es+un+sensor+art%C3%ADculos+cient%C3%ADficos&ots=JZgP_9Huae&sig=1KD1u4vVGNyIPF_TYt_c-bc6HW8#v=onepage&q=que%20es%20un%20sensor%20art%C3%ADculos%20cient%C3%ADficos&f=false

Artedimico. (2022). QUE ES UN AUTOCLAVE. Equipos Y Laboratorio de Colombia. <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/inicio>

Capacoila. (2019). Conocimiento sobre esterilización en autoclave, de enfermeros del centro quirúrgico-Hospital III Base Puno-EsSalud. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11213>

Carrión, (2014). Estándar de usabilidad para la interfaz gráfica de usuario en los proyectos de desarrollo de software. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/14156/1/Carri%C3%B3n%20Chamba%2C%20Rober%20Alonso.pdf>

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

Cruz, M. (2011). Bases de Datos, Conceptos y sus Características. Recuperado de: <http://www.gridmorelos.uaem.mx/~mcruz/cursos/miic/bd1.pdf>

Ellibrodepython. 2021. "Intermediate Python." In Creative Commons, 75. <https://python-intermedio.readthedocs.io/es/latest/> (April 8, 2021).

European Committee for Standardization. (2004). EN 13060: Small steam sterilizers. Brussels, Belgium: CEN.

Filtrashop. (2020, November 4). Filtros de sedimentos ¿Qué son y cómo funcionan? Filtrashop. <https://filtrashop.com/filtros-de-sedimentos-que-son-y-como-funcionan/>

Filtrashop. (2022). Suavizadores o ablandadores de agua dura en México. Recuperado 12 de febrero de 2025, de <https://filtrashop.com/categoria-producto/tratamiento-de-agua/suavizadores-de-agua/>

Galileo Equipos. (2022). Tipos de Autoclaves Para Esterilización. Recuperado de: https://www.galileoequipos.com/blog/tipos-de-autoclaves-para-esterilizacion/#Tipos_de_Autoclaves

Garrido, (2015). Manual básico del uso de autoclaves. Recuperado de: <https://tuttnauer.com/blog/esterilizacion-por-autoclave/que-es-un-autoclave>

Gonzales, (2004). El diseño de interfaz gráfica de usuario para publicaciones digitales. Recuperado de: https://www.revista.unam.mx/vol.5/num7/art44/ago_art44.pdf

Interempresas (2021). Tratamiento de agua para calderas. Recuperado de: <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/356671-Tratamiento-de-agua-para-calderas.html>

Lenntech (2024). El agua en la central de esterilización. Cisa. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm#ixzz2SGsLOPBo>

Loor, G. y Robles, (2024) Eficiencia del carbón activado (ca) procedente de los residuos de bambú (*Bambusa vulgaris*) Para remoción de contaminante del agua. Recuperado de: https://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/2356/1/TIC_IA82D.pdf

Marqués, M. (2011). Base de datos. Recuperado de: <https://bdigital.uvhm.edu.mx/wp-content/uploads/2020/05/Bases-de-Datos.pdf>

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (9th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Muñoz, E. J. (2023, 24 octubre). ¿Cómo funciona una autoclave de vapor? Equipamiento JM. <https://equipamientojm.com/todo-sobre-autoclaves/como-funciona-un-autoclave/>

PRYON. (2023). ¿Qué es un Autoclave? Pryon.es. <https://pryon.es/que-es-un-autoclave/>

Raspberry Pi Foundation (6 de octubre de 2021). Recuperado de: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>

Robilotti, S. & Couso, A. (2011). Procesos de esterilización. Recuperado de: <https://codeinep.org/wp-content/uploads/2017/04/PE-C1.pdf>

Sánchez, J. (2023). Unidad Didáctica 4. Creación de bases de datos en SQLite. Recuperado de: <https://josejuansanchez.org/bd/unidad-04-sqlite/index.pdf>

Serra, M. D. (2013). Guía para el manejo de la autoclave en la central de esterilización del hospital universitario de Ceuta. Obtenido de <https://tinyurl.com/y6dy2ubk>

Silvestre, C., Fagoaga, L., Garciandía, M. J., Lanzeta, I., Mateo, M. C., & Zapata, M. C. (2000). Esterilización. In *Anales del Sistema Sanitario de Navarra* (Vol. 23, pp. 95-103).

The QT Company 2022 (26 de septiembre de 2014). Design & Develop Software for Embedded Devices. Recuperado de: <https://www.qt.io/product/develop-embeddeddevices?hsLang=en>

Uriel Marín Monterde. (2017). Lenguajes de Programación. Unam.mx. https://repositorio-uapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2655/mod_resource/content/1/UAPA-Lenguajes-Programacion/index.html

Vignoli, (2006). Esterilización y desinfección. [línea]. Disponible en <http://www.higiene.edu.uy/cefa/Libro2002/Cap,2027>.

APÉNDICES

APÉNDICE A. GUÍAS DE LABORATORIO DE ACTIVIDADES PRACTICAS

ACTIVIDAD PRACTICA N.º 1

OBJETIVO: Verificar el correcto funcionamiento de electroválvula solenoide. Utilizando herramientas e instrumentos adecuados.

INSTRUMENTOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES

Pinza amperimétrica y multímetro.

PROCEDIMIENTO

1. Prueba de bobina:

- Desconectar eléctricamente EV2
 - Abrir borneras portafusibles identificadas con EV2 de tablero de control.
 - Medir la resistencia entre las terminales de la bobina y comprobar con los valores establecidos por el fabricante, anotar en Tabla 1.

2. Prueba de funcionamiento:

- Conectar eléctricamente EV2 y encender (Botón ON/OFF de EV2).
 - **Escucha:** Debe hacer "*clic*" al energizar y verificar magnetización de bobina acercando una pieza metálica.
 - Con pinza amperimétrica medir la corriente consumida por la electroválvula y comprobar que sea la especificada, anotar en Tabla 1.
 - Apagar EV2

En base a los datos medidos de resistencia, corriente y voltaje de alimentación calcular la potencia consumida y completar tabla1.

TABLA 1. COMPROBACION DE ELECTROVALVULA

	VALORES DE FABRICANTE	VALORES MEDIDOS
MARCA	THERMOVAL	
MODELO	SOLENOIDE DE 2 VIAS	
RESISTENCIA DE SOLENOIDE	22420	
POTENCIA DE BOBINA	20W	
TENSION DE ALIMENTACION	220 VAC	
CORRIENTE CONSUMIDA	0.09 A	
ESTADO DE FUNCIONAMIENTO	OPERATIVO	
CALCULOS Y OBSERVACIONES:		

ACTIVIDAD PRACTICA N.º 2

OBJETIVO: Verificar el correcto funcionamiento de sensor de temperatura PT100. Utilizando herramientas e instrumentos adecuados.

INSTRUMENTOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES

Multímetro.

PROCEDIMIENTO

1. Identificación de hilos:

- Desconectar eléctricamente el PT100
 - Abrir borneras portafusibles identificadas con PT100, en tablero de control.
 - Mide resistencia entre cada par de terminales: Toca las puntas del multímetro a cada combinación posible de 2 hilos (ejemplo: A-B, A-C, B-C).
 - **Resultados esperados:**
 Los dos cables que muestren una resistencia casi 0Ω o unos pocos ohmios: Son los hilos comunes.
 El tercer cable (que muestra $\sim 100 \Omega$ con los otros dos, típico de un PT100 a temperatura ambiente): Es el cable opuesto del sensor.

2. Prueba de funcionamiento:

- Medir resistencia en frio del PT100.

- Conecta las puntas del multímetro a las terminales del PT100, A temperatura ambiente (ej. 25°C): debe marcar $\approx 109\text{--}110 \Omega$.
- Contrastar el valor leído de resistencia con Tabla 2.

TABLA 2. EXTRACTO DE TABLA RESISTENCIA VS TEMPERATURA

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C
0.00	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0.00
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00

- Si los valores están dentro de un margen aceptable $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, el sensor está funcionando correctamente.

OBSERVACIONES:

ACTIVIDAD PRACTICA N.º 3

OBJETIVO: Verificar el correcto funcionamiento de resistencias calefactoras. Utilizando herramientas e instrumentos adecuados.

INSTRUMENTOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES

Multímetro y pinza amperimétrica.

PROCEDIMIENTO

1. Medición de resistencia eléctrica (ohmiaje)

- Desconectar eléctricamente RS y RI
 - Abrir borneras portafusibles identificadas con RS y RI, en vista lateral izquierda del equipo.
 - Mide la resistencia equivalente de RS y RI
 - **Resultados esperados:**
Rango valido por el fabricante RS (25.8 Ω – 31.6 Ω) y RI (17.4 Ω – 21.2 Ω)

2. Prueba de funcionamiento:

- Conectar eléctricamente RS y RI, encender (Botón ON/OFF de RS y RI).
 - Con pinza amperimétrica medir la corriente consumida por RS y RI.

En base a los datos medidos de resistencia, corriente y voltaje de alimentación calcular la potencia consumida por cada grupo de resistencias.

CALCULOS Y OBSERVACIONES:

APÉNDICE B. EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA N°1

Encuesta para estudiantes de la carrera de Ingeniería Biomédica

B *I* U ↻ ✕

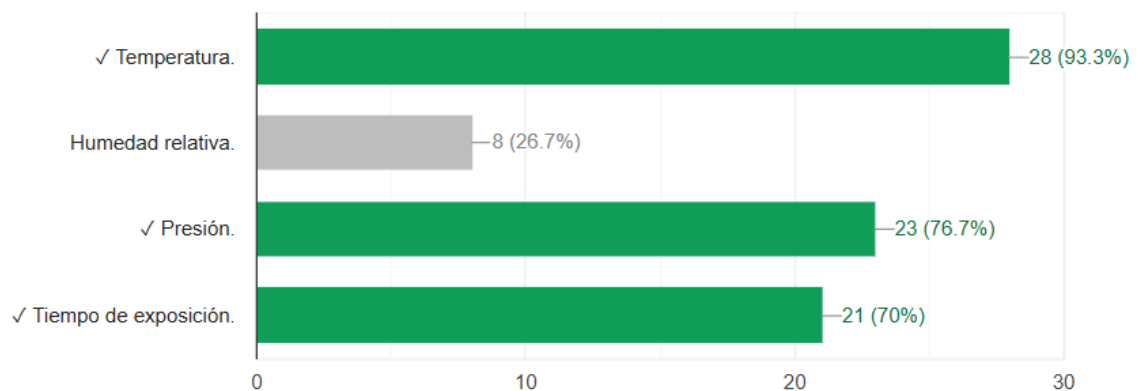
Este cuestionario va referido al funcionamiento de autoclaves a vapor sin sistema de vacío y plantas de tratamiento de agua para esterilizadores. **Tienes un tiempo limitado de 15 minutos para completarlo.**

Por favor, responde honestamente y dentro del tiempo establecido para obtener una evaluación precisa de tus conocimientos.

[Copiar gráfico](#)

1.- ¿Cuál de los siguientes parámetros es fundamental para un ciclo de esterilización exitoso? (Selecciona todas las correctas)

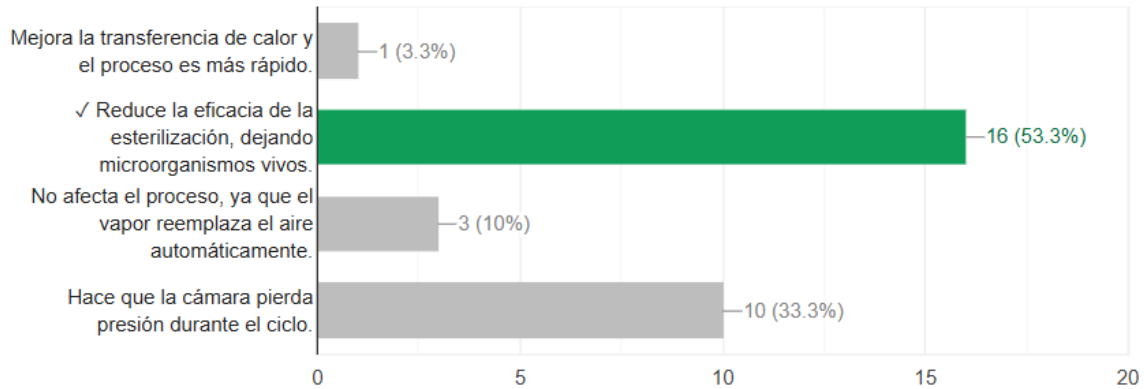
14/30 respuestas correctas



 Copiar gráfico

2.- ¿Qué sucede si hay presencia de aire residual durante el proceso de esterilización?

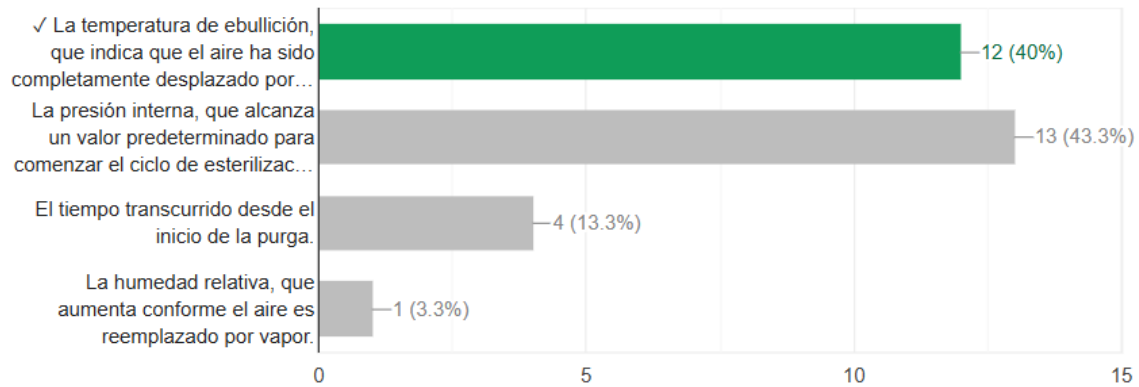
16/30 respuestas correctas

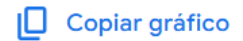


 Copiar gráfico

3.- ¿Cuál es el parámetro clave que el sistema de control utiliza para determinar el momento adecuado para cerrar la válvula de purga y comenzar a aumentar la presión en un esterilizador a vapor?

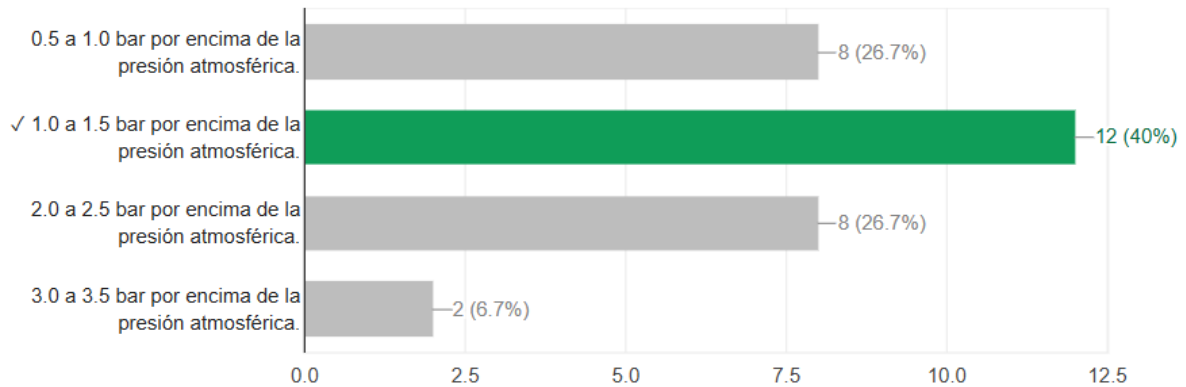
12/30 respuestas correctas





4.- En un ciclo de esterilización a 121 °C en una autoclave, ¿cuáles son los niveles aproximados de presión que se manejan durante el proceso?

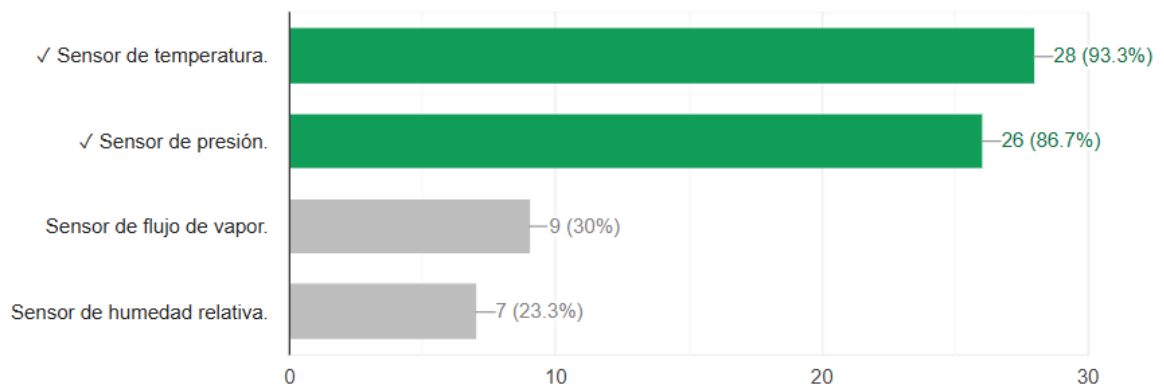
12/30 respuestas correctas



5.- ¿Qué sensores son esenciales para monitorear el proceso de esterilización en un autoclave? (Selecciona todas las correctas)



15/30 respuestas correctas

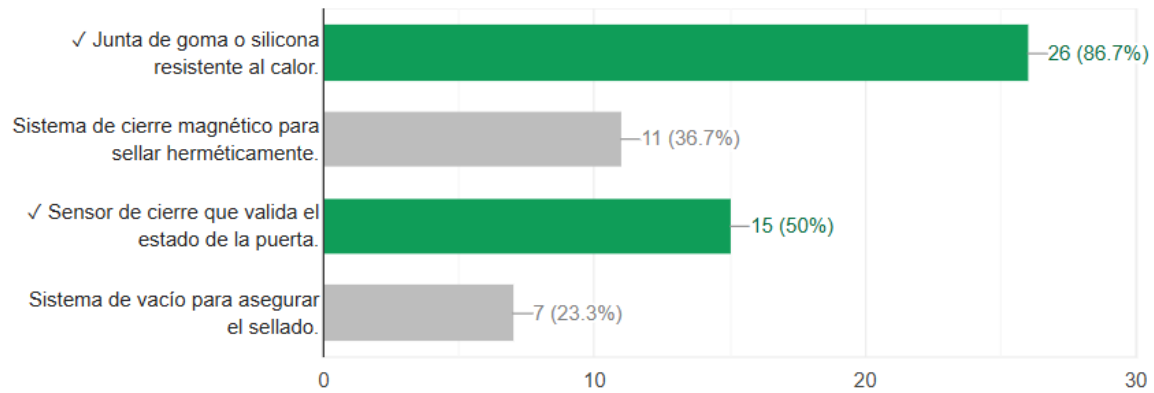


 Copiar gráfico

6.- ¿Qué elementos componen el sistema de sellado de la puerta en una autoclave de sobremesa de desplazamiento por gravedad?

(Selecciona todas las correctas)

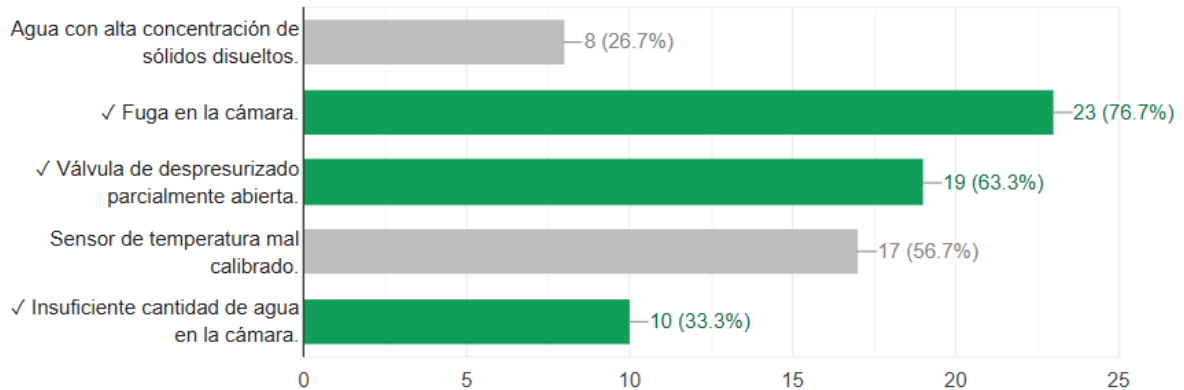
6/30 respuestas correctas



 Copiar gráfico

7.- ¿Cuáles son las posibles causas de que la cámara de una autoclave se caliente, pero no alcance la presión de trabajo requerida para el ciclo?

(Selecciona todas las correctas)

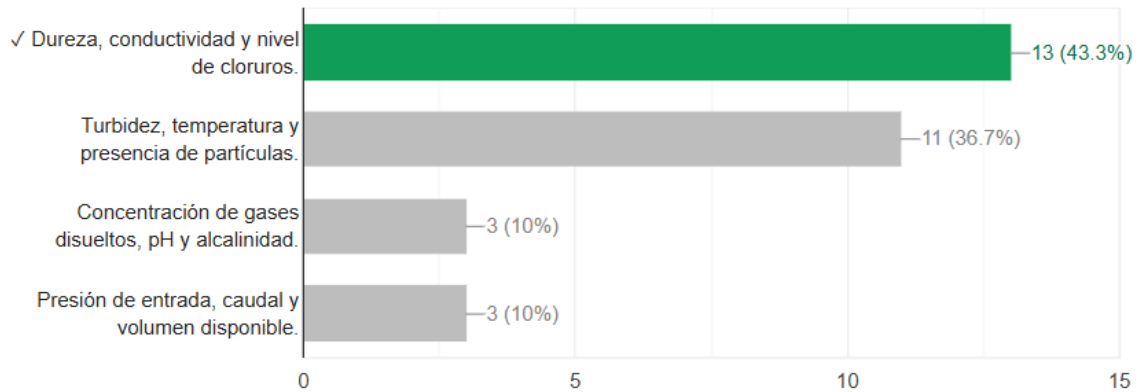
2/30 respuestas correctas



 Copiar gráfico

8.- ¿Cuáles son los parámetros más importantes que deben controlarse para garantizar la calidad del agua utilizada en una autoclave a vapor y evitar daños al equipo o interferencias en el proceso de esterilización?

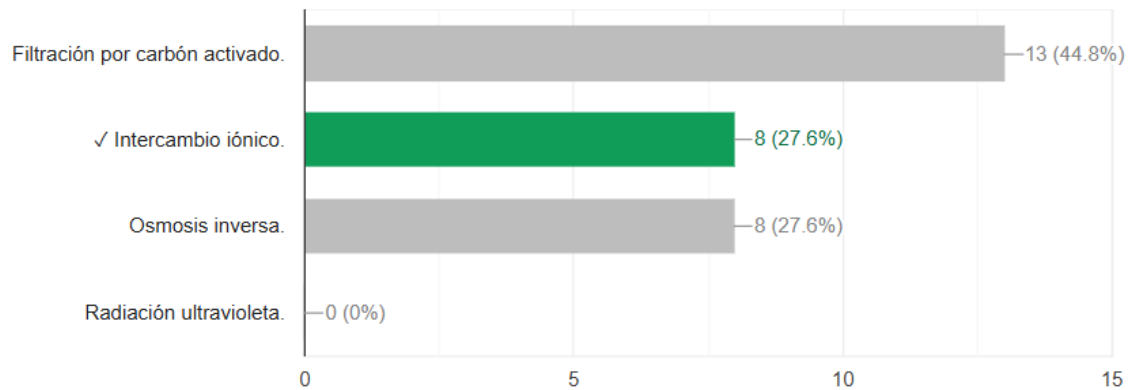
13/30 respuestas correctas



 Copiar gráfico

9.- ¿Qué proceso es utilizado para reducir la dureza del agua?

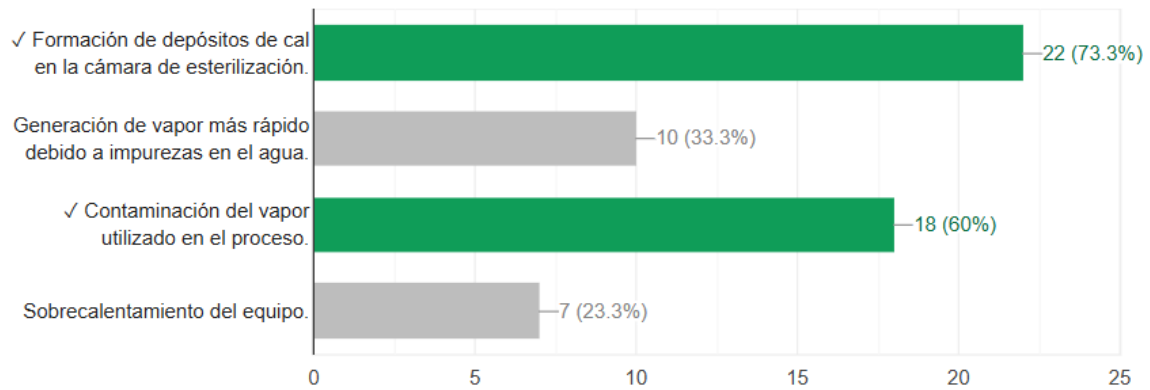
7/29 respuestas correctas



10.- ¿Cuál de los siguientes problemas puede surgir si el agua no está correctamente tratada?

(Selecciona todas las correctas)

8/30 respuestas correctas



APÉNDICE C. EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA N°2

Encuesta para estudiantes de la carrera de Ingeniería Biomédica

B *I* U  

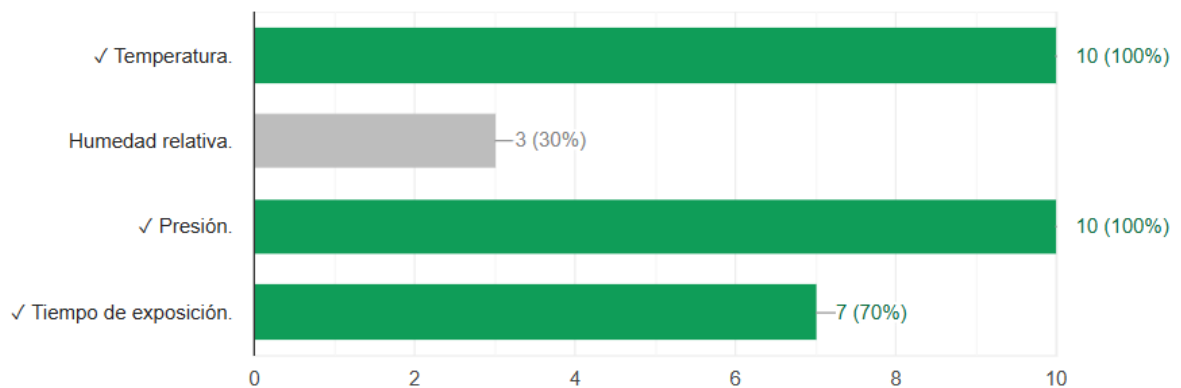
Este cuestionario va referido al funcionamiento de autoclaves a vapor sin sistema de vacío y plantas de tratamiento de agua para esterilizadores. **Tienes un tiempo limitado de 15 minutos para completarlo.**


Por favor, responde honestamente y dentro del tiempo establecido para obtener una evaluación precisa de tus conocimientos.

 [Copiar gráfico](#)

1.- ¿Cuál de los siguientes parámetros es fundamental para un ciclo de esterilización exitoso? (Selecciona todas las correctas)

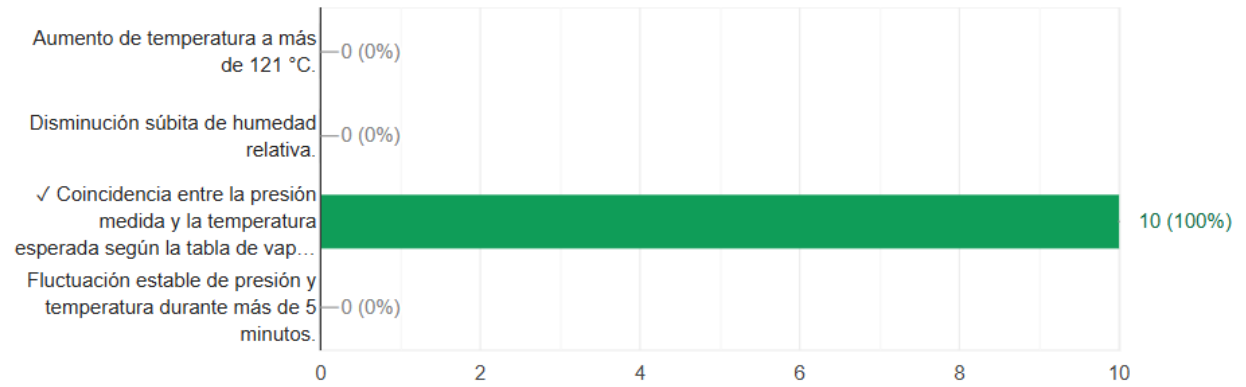
4/10 respuestas correctas




 Copiar gráfico

2.- ¿Qué condición física interna se utiliza como referencia para validar que se ha alcanzado el estado de vapor saturado dentro de la cámara?

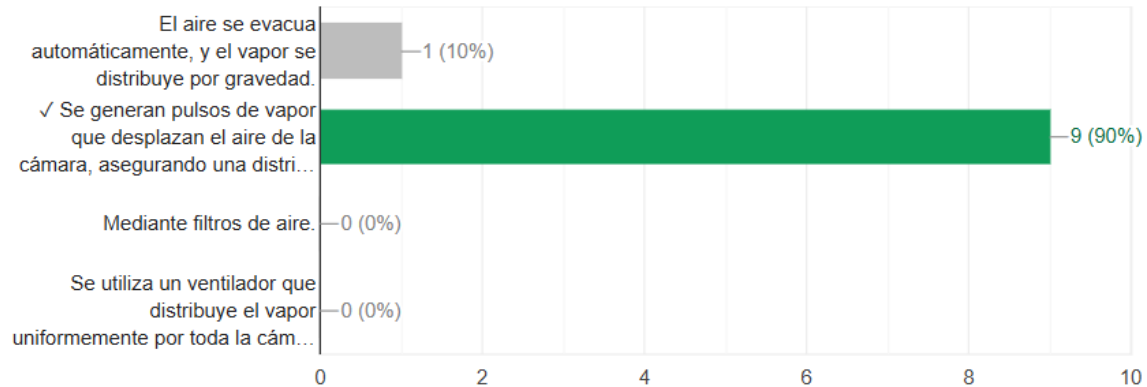
10/10 respuestas correctas




 Copiar gráfico

3.- ¿Cómo se elimina el aire y se garantiza una distribución uniforme del vapor dentro de la cámara en un esterilizador sin bomba de vacío?

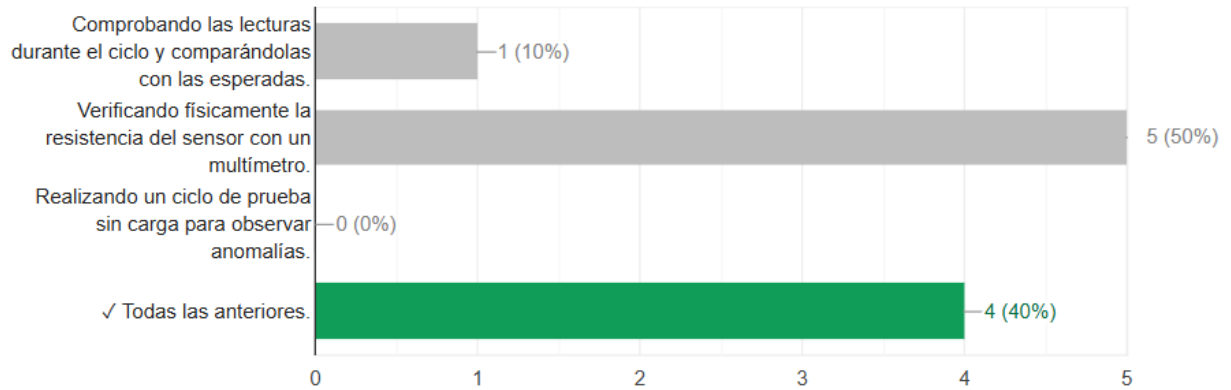
9/10 respuestas correctas



 Copiar gráfico

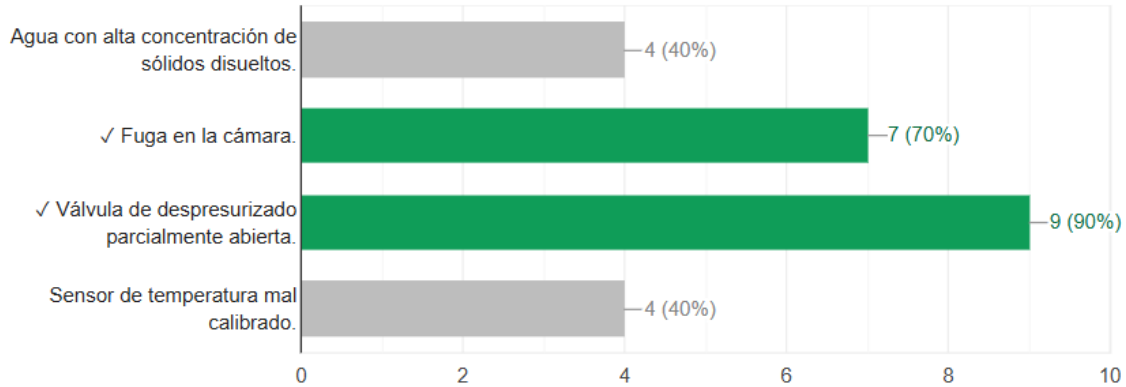
4.- ¿Cómo se diagnostica un fallo en el sensor de temperatura?

4/10 respuestas correctas


 Copiar gráfico

5.- ¿Cuáles son las posibles causas de que la cámara de una autoclave se caliente, pero no alcance la presión de trabajo requerida para el ciclo? (Selecciona todas las correctas)

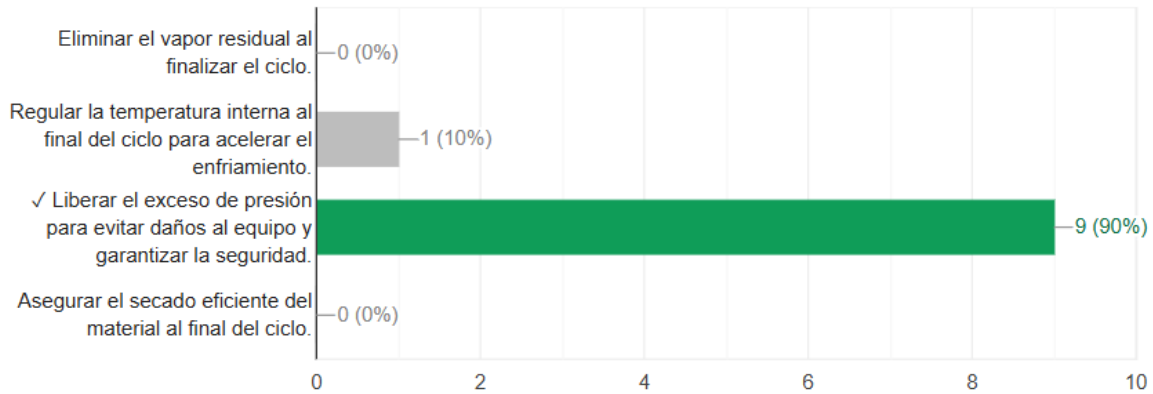
5/10 respuestas correctas



 Copiar gráfico

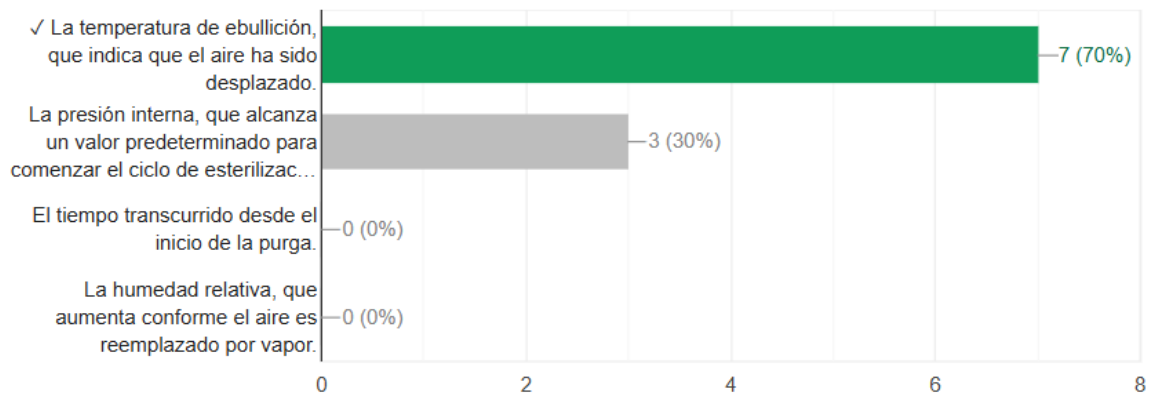
6.- ¿Cuál es el propósito principal de la válvula de alivio en el sistema de un esterilizador a vapor?

9/10 respuestas correctas


 Copiar gráfico

7.- ¿Cuál es el parámetro clave que el sistema de control utiliza para determinar el momento adecuado para cerrar la válvula de purga y comenzar a aumentar la presión en un esterilizador a vapor?

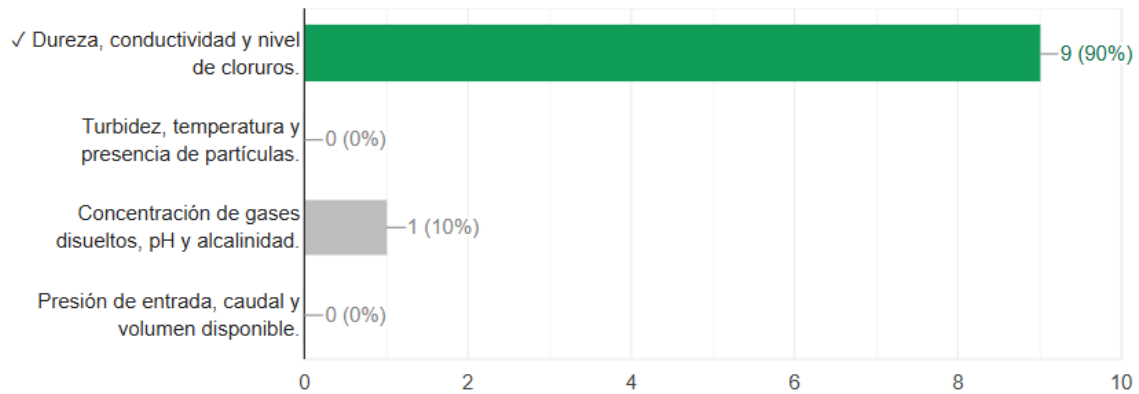
7/10 respuestas correctas



 Copiar gráfico

8.- ¿Cuáles son los parámetros más importantes que deben controlarse para garantizar la calidad del agua utilizada en una autoclave a vapor y evitar daños al equipo o interferencias en el proceso de esterilización?

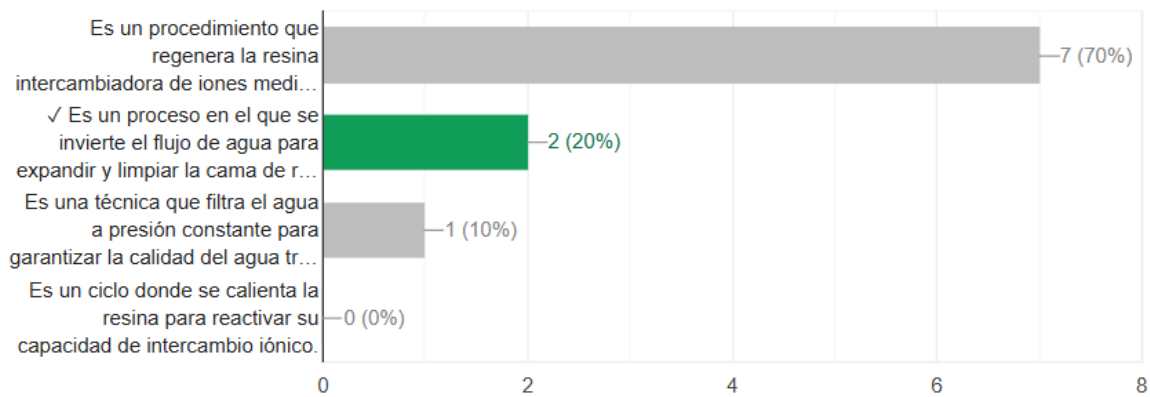
9/10 respuestas correctas



 Copiar gráfico

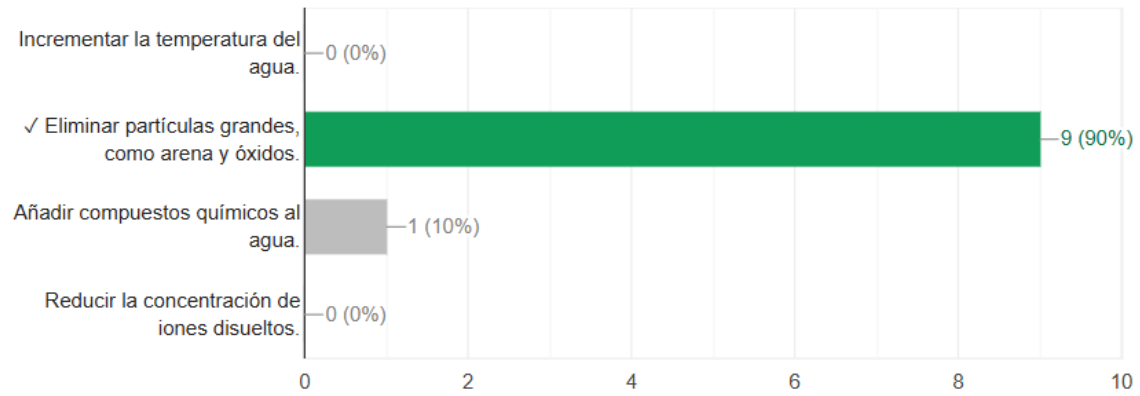
9.- ¿En qué consiste el proceso de retrolavado en un ablandador de agua, y cuál es su principal objetivo?

2/10 respuestas correctas



10.- ¿Cuál es la función de un pre-filtro en una planta de tratamiento de agua?

9/10 respuestas correctas



APÉNDICE D. MANUAL DE USUARIO

Manual de Usuario

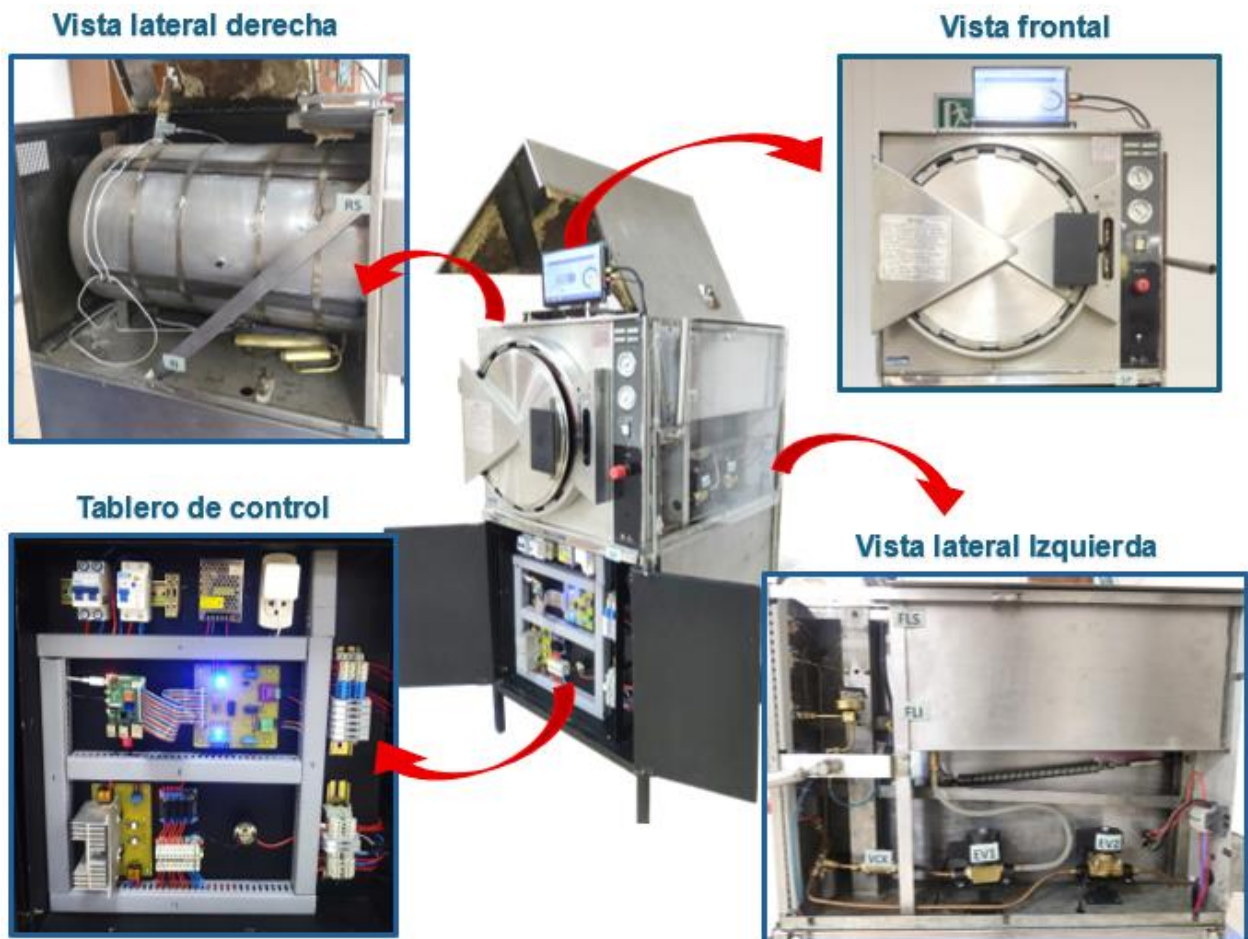
1. Introducción

Este manual proporciona las instrucciones para el uso correcto y seguro de la autoclave educativa y su planta de tratamiento de agua complementaria. Dirigido a estudiantes, docentes y personal administrativo, el documento detalla los procedimientos operativos, medidas de seguridad, y recomendaciones de mantenimiento para garantizar un funcionamiento óptimo, seguro y didáctico del sistema.

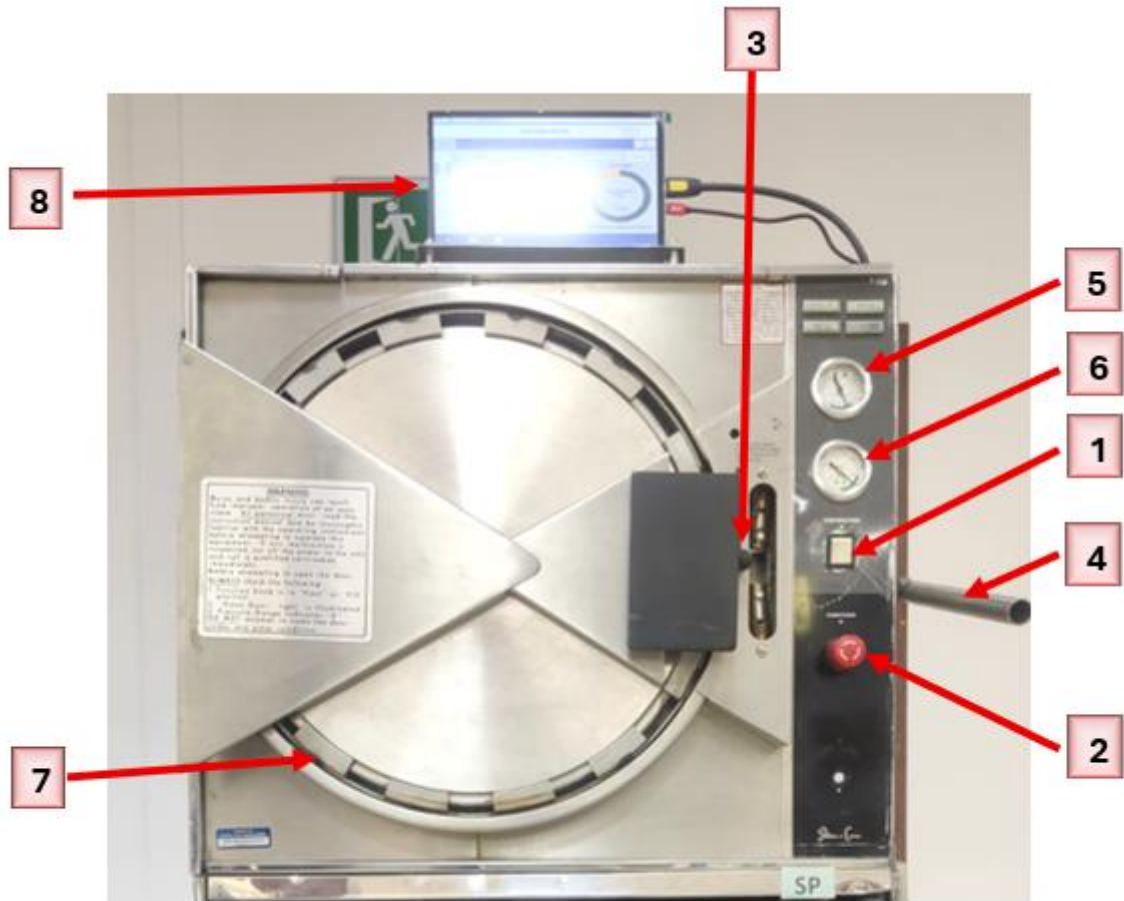
2. Descripción estructural

Esta sección describe las partes principales que conforman el sistema:

2.1. Autoclave educativa



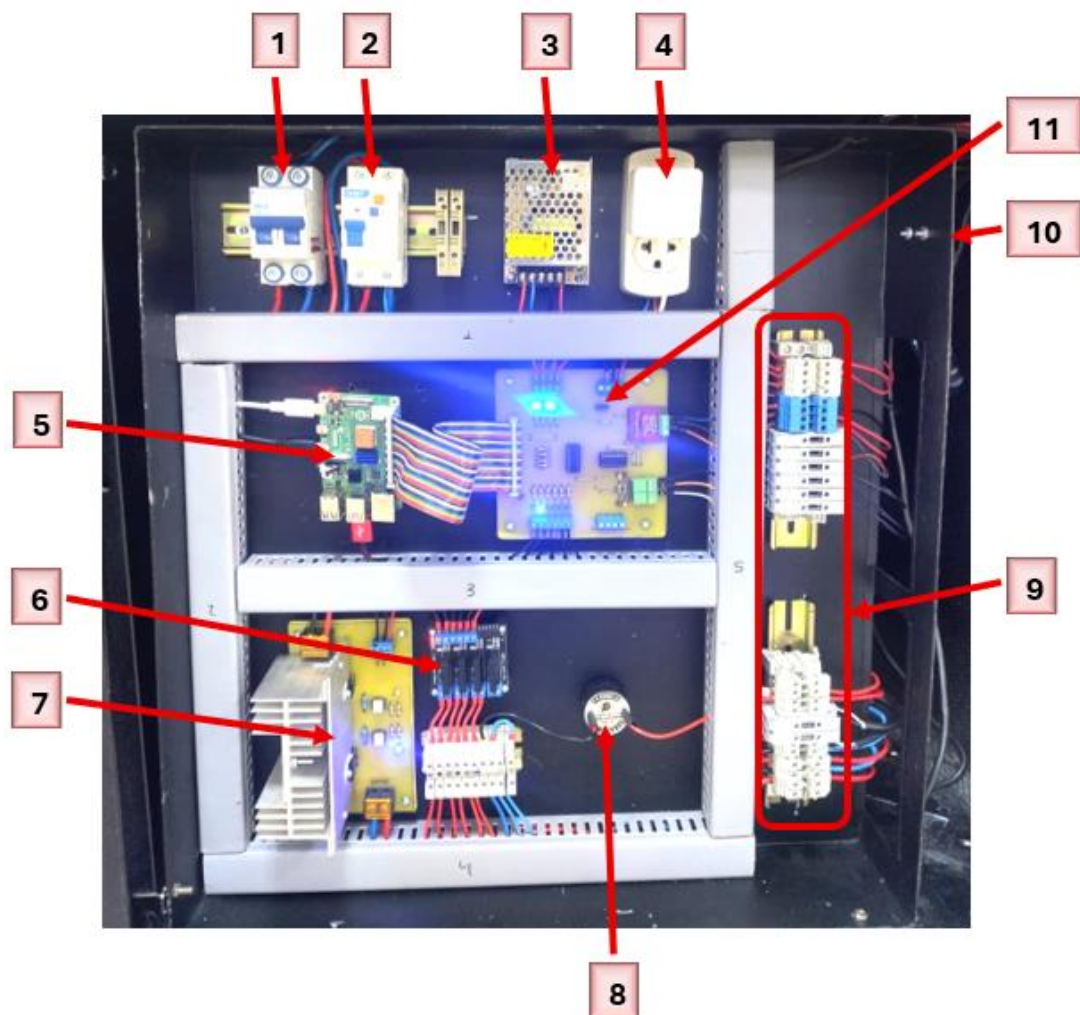
- Vista frontal



N°	Nombre	Descripción
1	Interruptor on/off	Control de encendido/apagado del equipo.
2	Parada de emergencia	Detiene inmediatamente todas las operaciones en caso de fallo o riesgo.
3	Botón de apertura de puerta	Debe presionarse antes de mover la manija de la puerta hacia arriba a la posición de apertura.
4	Manija de puerta	Cuando la manija de la puerta está hacia abajo, la puerta está bloqueada. Cuando está hacia arriba, la puerta se abre.

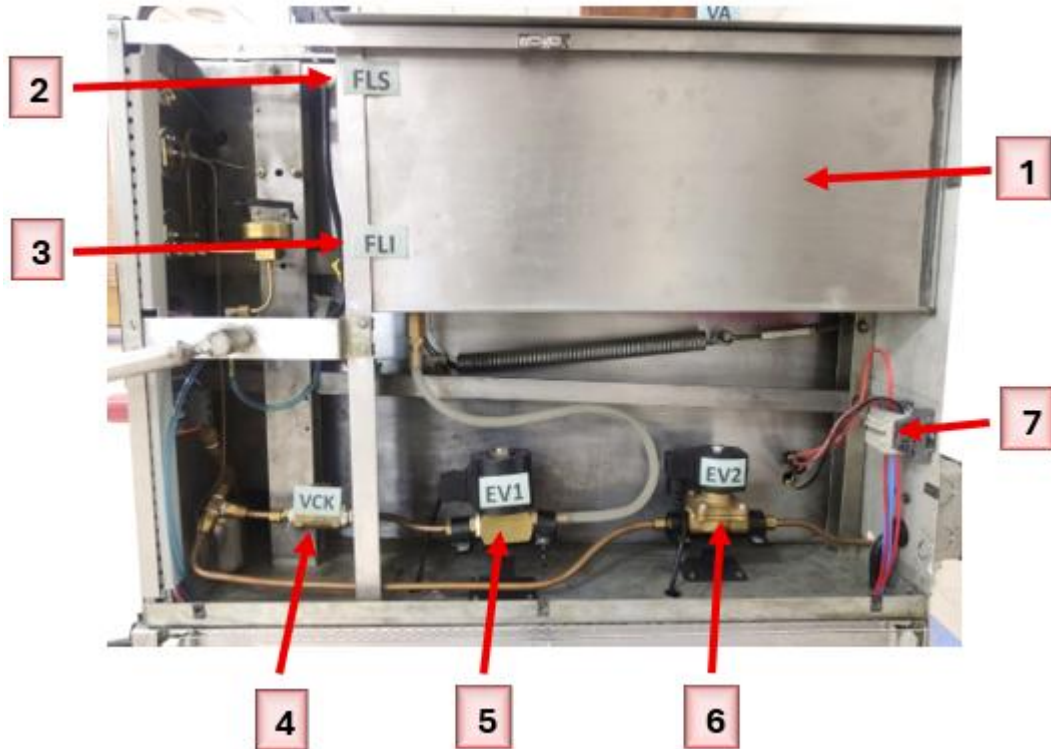
5	Termómetro analógico	Mide la temperatura del vapor en la línea de descarga de la cámara.
6	Manómetro analógico	Mide la presión dentro de la cámara.
7	Abrazadera de la puerta	Anillo de sujeción patentado proporciona máxima seguridad al bloquear todo el borde de la puerta.
8	Pantalla de control y visualización	Medio por el cual el usuario interactúa con el sistema.

- **Tablero de control**



N°	Nombre	Descripción
1	Interruptor termomagnético	Protección contra sobrecargas y cortocircuitos del circuito principal.
2	Interruptor diferencial	Seguridad contra fugas de corriente (protección personal)
3	Fuente de alimentación externa	Encargado de suministrar el voltaje de 5 V DC para acondicionamiento.
4	Fuente de alimentación raspberry pi	Encargado de suministrar energía al raspberry
5	Raspberry pi 4B	Unidad central de procesamiento y control del sistema
6	Módulo de relé de 4 canales	Encargados de la activación de electroválvulas (EV1, EV2) y buzzer. Cierran el circuito de alimentación de 220 VAC para suministrar energía a dichos actuadores de bajo consumo.
7	Placa SSR resistencias	Encargados de la activación de resistencias eléctricas (RS, RI). Cierran el circuito de alimentación de 220 VAC para suministrar energía a dichos actuadores de alto consumo.
8	Buzzer	Indicador acústico de alarmas.
9	Borneras de conexión	Puntos de interconexión para cableado y señales externas.
10	Sensor de presión	Mide la presión dentro de la cámara. Y permite su digitalización.
11	Placa de control y generación /captación de señales	Placa interfaz para acondicionamiento de señales analógicas/digitales.

- Vista lateral izquierda

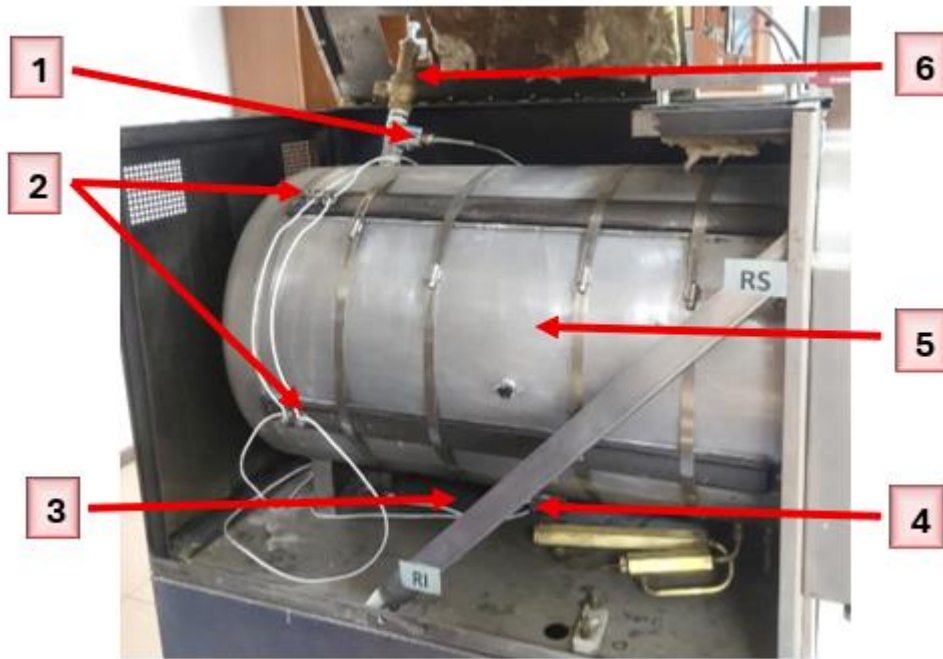


N°	Nombre	Descripción
1	Reservorio de agua	Depósito para almacenamiento y suministro de agua tratada.
2	Flotador de nivel superior	Sensor que detecta nivel máximo de agua.
3	Flotador de nivel inferior	Sensor que detecta nivel mínimo de agua.
4	Válvula check	Válvula antirretorno que previene flujo inverso.
5	Electroválvula EV1	Válvula controlada eléctricamente para el paso de agua a la cámara.
6	Electroválvula EV2	Válvula controlada eléctricamente para despresurización y purga de vapor.

7	Borneras de conexión de resistencias	Terminales para conexión segura y fácil de elementos calefactores
----------	---	---

- **Vista lateral derecha**

-

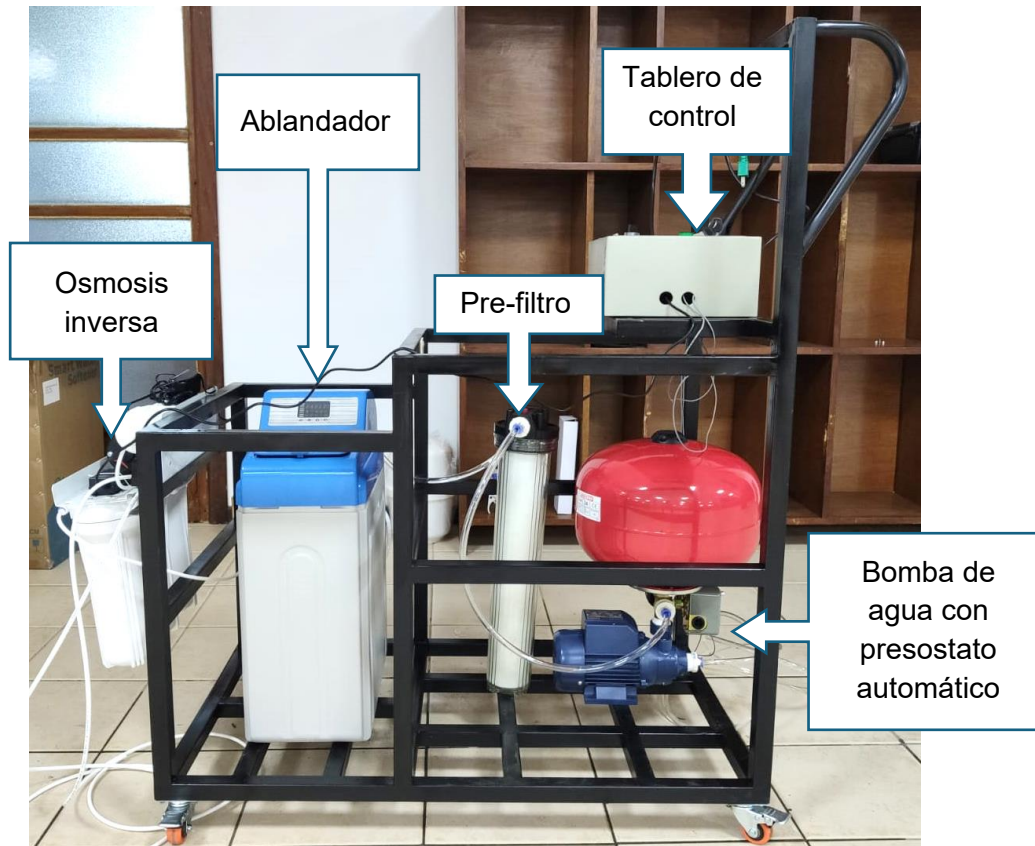


N°	Nombre	Descripción
1	Sensor de temperatura PT100	Sensor de temperatura de platino para medición exacta en la cámara.
2	Resistencias superiores	4 elementos calefactores conectados en paralelo.
3	Resistencias inferiores	3 elementos calefactores conectados en paralelo.
4	Termostato	Dispositivo de seguridad mecánico que corta alimentación si hay sobrecalentamiento en resistencias inferiores.

5	Cámara de esterilización	Recipiente para procesos de esterilización.
6	Válvula de alivio	Mecanismo de seguridad pasivo que libera presión ante presiones elevadas a 4 bares.

2.2. Planta de tratamiento de agua

3.



N°	Nombre	Descripción
1	Tablero de control	Panel que concentra conexiones eléctricas y acciones del sistema de tratamiento.
2	Bomba de agua	Motor con aspas que impulsa el agua desde el tanque de almacenamiento o red municipal al sistema.

3	Presostato automático	Interruptor que controla el encendido de la bomba según la presión del sistema.
4	Prefiltro	Filtro de cartucho que retiene partículas sólidas como arena, óxido o lodo.
5	Ablandador automático	Dispositivo que elimina sales de calcio y magnesio mediante resina de intercambio iónico.
6	Sistema de ósmosis inversa	Unidad con membrana semipermeable que purifica el agua eliminando sales y metales.

4. Requisitos eléctricos

La autoclave requiere 4500 W de potencia a 220 voltios, monofásico. En la parte posterior del esterilizador se incluye una caja de conexiones con orificios troquelados para conductos. Esta caja de conexiones se utiliza para conectar la línea eléctrica.

5. Pasos para Operar la Autoclave

- I. **Encendido:** Conectar el equipo a una fuente de 220V, asegúrese que los interruptores termomagnético y diferencial estén activados (palanca arriba) y presionar el interruptor ON.
- II. **Inicio de sesión:** Presionar botón de inicio de sesión e ingresar datos de usuario.

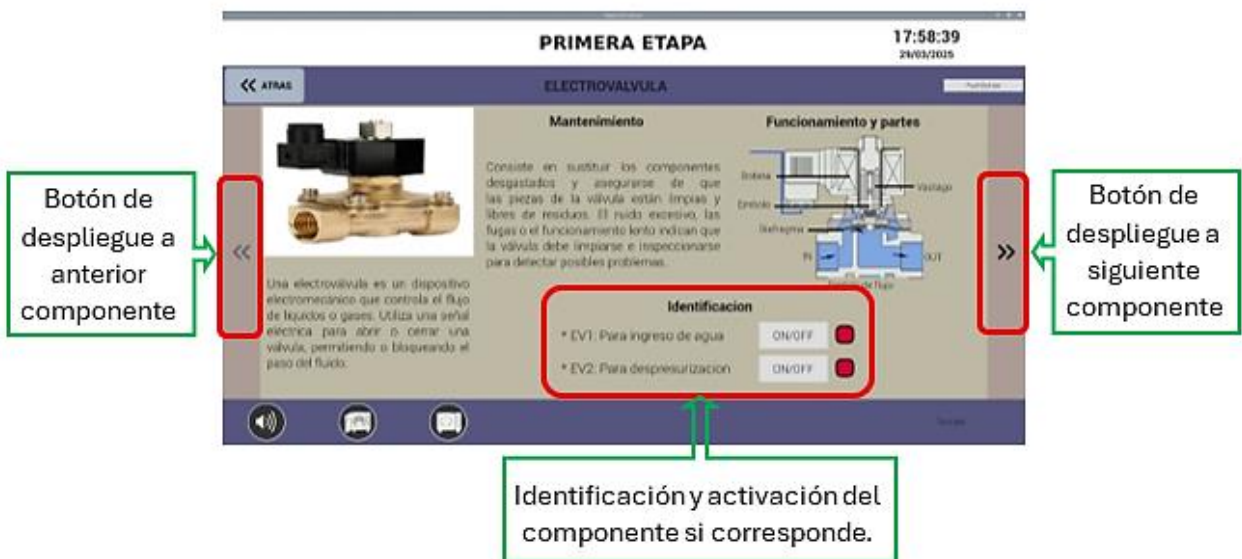


Según el tipo de usuario ya sea administrativo, docente o estudiante el sistema permitirá acceso a un distinto nivel de funcionalidad

- III. **Selección de etapa:** En el menú principal se permite el ingreso a las distintas etapas del sistema.



- **Etapa 1:** Presionando el botón de primera etapa se accede a la información, identificación de componentes y guías de verificación o mantenimiento.



- **Etapa 2:** Presionando el botón de segunda etapa se accede al ciclo de esterilización automatizado con seguimiento y explicación paso a paso de todo el proceso de esterilización.

Paso 1: Ingreso de agua

Paso 2: Cerrar puerta e iniciar ciclo de esterilización

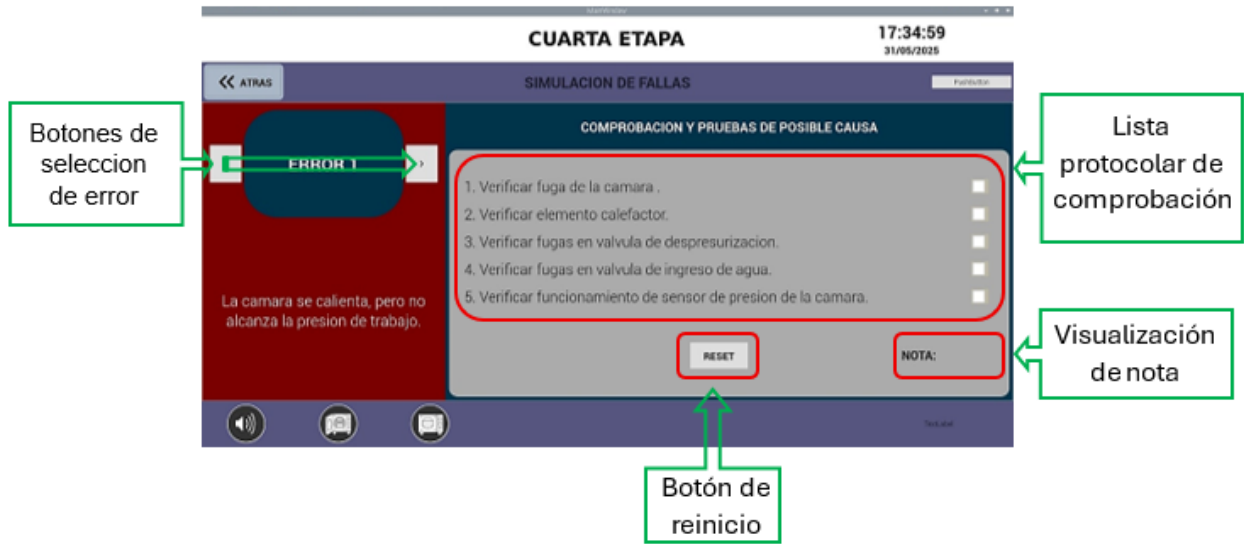
Botón de visualización de alarmas

- o **Etapa 3:** Simulación del sistema de tratamiento de agua.

Inicio de fase de tratamiento

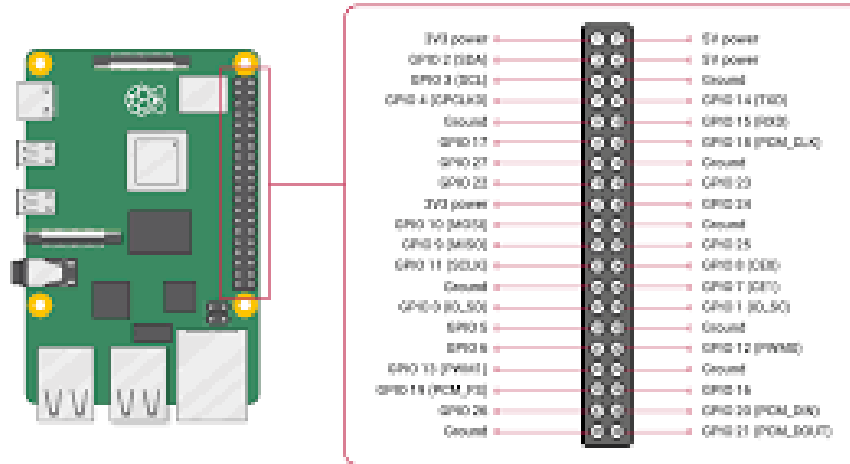
Botón de desplazamiento por cada fase de tratamiento

- **Etapa 4:** Resolución de fallas simuladas.



ANEXOS

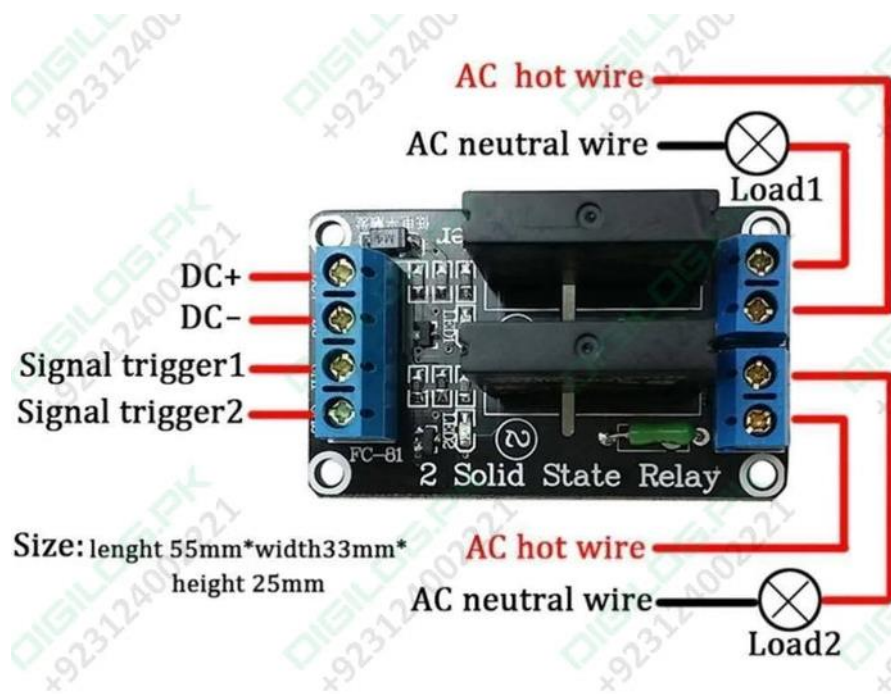
A1. PINOUT RASPBERRY PI 4 B



A2. PINOUT MODULO MAX31865



A3. PINOUT MODULO DE RELAY DE ESTADO SOLIDO



A4. DATASHEET SENSOR MAX31865

MAX31865

RTD-to-Digital Converter

General Description

The MAX31865 is an easy-to-use resistance-to-digital converter optimized for platinum resistance temperature detectors (RTDs). An external resistor sets the sensitivity for the RTD being used and a precision delta-sigma ADC converts the ratio of the RTD resistance to the reference resistance into digital form. The MAX31865's inputs are protected against overvoltage faults as large as $\pm 45\text{V}$. Programmable detection of RTD and cable open and short conditions is included.

Applications

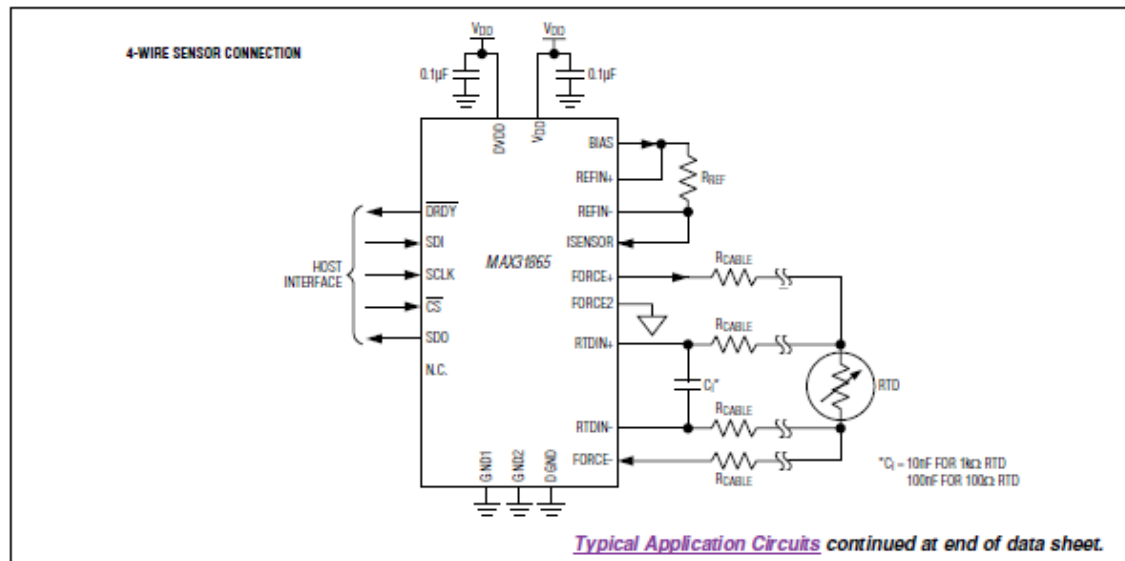
- Industrial Equipment
- Medical Equipment
- Instrumentation

Ordering Information appears at end of data sheet.

Benefits and Features

- Integration Lowers System Cost, Simplifies Design Efforts, and Reduces Design Cycle Time
 - Simple Conversion of Platinum RTD Resistance to Digital Value
 - Handles 100Ω to $1\text{k}\Omega$ (at 0°C) Platinum RTDs (PT100 to PT1000)
 - Compatible with 2-, 3-, and 4-Wire Sensor Connections
 - SPI-Compatible Interface
 - 20-Pin TQFN and SSOP Packages
- High Accuracy Facilitates Meeting Error Budgets
 - 15-Bit ADC Resolution; Nominal Temperature Resolution 0.03125°C (Varies Due to RTD Nonlinearity)
 - Total Accuracy Over All Operating Conditions: 0.5°C (0.05% of Full Scale) max
 - Fully Differential V_{REF} Inputs
 - 21ms (max) Conversion Time
- Integrated Fault Detection Increases System Reliability
 - $\pm 45\text{V}$ Input Protection
 - Fault Detection (Open RTD Element, RTD Shorted to Out-of-Range Voltage, or Short Across RTD Element)

Typical Application Circuits



A5. DATASHEET SENSOR DE PRESION MPX5500



Pressure

Freescale Semiconductor

MPX5500
Rev 7, 09/2009

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5500 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element
- Available in Differential and Gauge Configurations

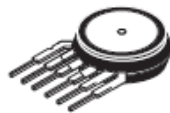
MPX5500 Series

0 to 500 kPa (0 to 72.5 psi)
0.2 to 4.7 V Output

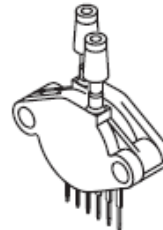
ORDERING INFORMATION

Device Name	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Marking
		None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
Unibody Package (MPX5500 Series)								
MPX5500D	867	-				-		MPX5500D
MPX5500DP	867C			-		-		MPX5500DP

UNIBODY PACKAGES



MPX5500D
CASE 867-08



MPX5500DP
CASE 867C-05



Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P1 > P2$. Decoupling circuit shown in Figure 4. required to meet electrical specifications.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	500	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_O	—	7.0	10	mAdc
Zero Pressure Offset ⁽³⁾	V_{off}	0.088	0.20	0.313	Vdc
Full Scale Output ⁽⁴⁾	V_{FSD}	4.587	4.70	4.813	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾	V_{FSS}	—	4.50	—	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	± 2.5	% V_{FSD}
Sensitivity	V/P	—	9.0	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms

1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.

2. Device is ratiometric within this specified excitation range.

3. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Full Scale Output (V_{FSD}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.

5. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

6. Accuracy (error budget) consists of the following:

Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.

Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.

Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .

ToSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .

ToOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .

Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSD} , at 25°C .

7. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

8. Warm-up Time is defined as the time required for the device to meet the specified output voltage after the pressure has been stabilized.

On-chip Temperature Compensation and Calibration

Figure 3 illustrates the Differential/Gauge basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm. (For use of the MPX5500D in a high pressure, cyclic application, consult the factory.)

The MPX5500 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

Figure 2 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in Figure 4. The output will saturate outside of the specified pressure range.

Figure 4 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

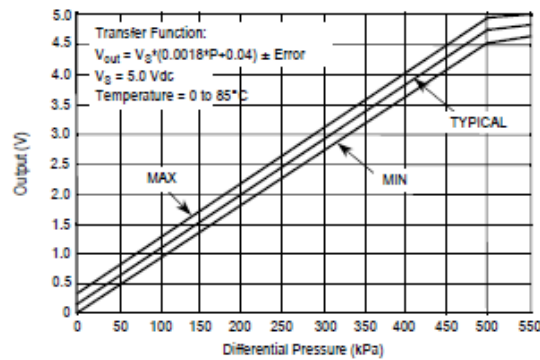


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

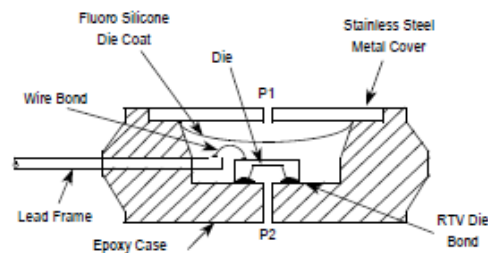


Figure 3. Cross-Sectional Diagrams (not to scale)

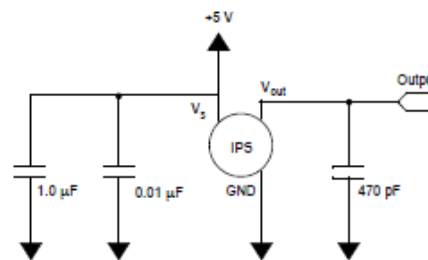


Figure 4. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering
 (For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646)

A6. DATASHEET CONVERTOR A/D MCP3008



MCP3004/3008

2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface

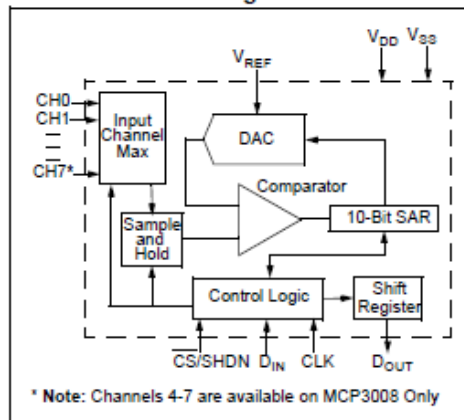
Features

- 10-bit resolution
- ± 1 LSB max DNL
- ± 1 LSB max INL
- 4 (MCP3004) or 8 (MCP3008) input channels
- Analog inputs programmable as single-ended or pseudo-differential pairs
- On-chip sample and hold
- SPI serial interface (modes 0,0 and 1,1)
- Single supply operation: 2.7V - 5.5V
- 200 ksp/s max. sampling rate at $V_{DD} = 5V$
- 75 ksp/s max. sampling rate at $V_{DD} = 2.7V$
- Low power CMOS technology
- 5 nA typical standby current, 2 μA max.
- 500 μA max. active current at 5V
- Industrial temp range: $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
- Available in PDIP, SOIC and TSSOP packages

Applications

- Sensor Interface
- Process Control
- Data Acquisition
- Battery Operated Systems

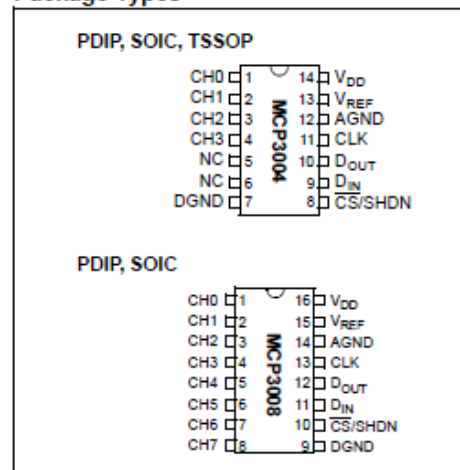
Functional Block Diagram



Description

The Microchip Technology Inc. MCP3004/3008 devices are successive approximation 10-bit Analog-to-Digital (A/D) converters with on-board sample and hold circuitry. The MCP3004 is programmable to provide two pseudo-differential input pairs or four single-ended inputs. The MCP3008 is programmable to provide four pseudo-differential input pairs or eight single-ended inputs. Differential Nonlinearity (DNL) and Integral Nonlinearity (INL) are specified at ± 1 LSB. Communication with the devices is accomplished using a simple serial interface compatible with the SPI protocol. The devices are capable of conversion rates of up to 200 ksp/s. The MCP3004/3008 devices operate over a broad voltage range (2.7V - 5.5V). Low-current design permits operation with typical standby currents of only 5 nA and typical active currents of 320 μA . The MCP3004 is offered in 14-pin PDIP, 150 mil SOIC and TSSOP packages, while the MCP3008 is offered in 16-pin PDIP and SOIC packages.

Package Types



A7. DATASHEET TRIAC BTA16



BTA16 B
BTB16 B

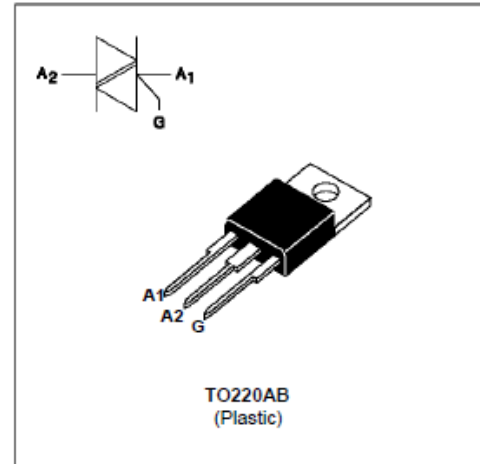
STANDARD TRIACS

FEATURES

- HIGH SURGE CURRENT CAPABILITY
- COMMUTATION : $(dV/dt)_c > 10V/\mu s$
- BTA Family :
INSULATING VOLTAGE = $2500V_{(RMS)}$
(UL RECOGNIZED : E81734)

DESCRIPTION

The BTA/BTB16 B triac family are high performance glass passivated PNP devices. These parts are suitable for general purpose applications where high surge current capability is required. Application such as phase control and static switching on inductive or resistive load.



ABSOLUTE RATINGS (limiting values)

Symbol	Parameter		Value	Unit	
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (360° conduction angle)	BTA	$T_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$	16	A
		BTB	$T_c = 90\text{ }^\circ\text{C}$		
I_{TSM}	Non repetitive surge peak on-state current (T_J initial = $25\text{ }^\circ\text{C}$)		$t_p = 8.3\text{ ms}$	170	A
			$t_p = 10\text{ ms}$	160	
I_2t	I_2t value		$t_p = 10\text{ ms}$	128	A^2s
di/dt	Critical rate of rise of on-state current Gate supply : $I_G = 500\text{mA}$ - $di_G/dt = 1\text{A}/\mu\text{s}$		Repetitive $F = 50\text{ Hz}$	10	$A/\mu\text{s}$
			Non Repetitive	50	
T_{stg} T_J	Storage and operating junction temperature range			- 40 to + 150	$^\circ\text{C}$
				- 40 to + 125	$^\circ\text{C}$
T_I	Maximum lead temperature for soldering during 10 s at 4.5 mm from case			260	$^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	BTA / BTB16-... B				Unit
		400	600	700	800	
V_{DRM} V_{RRM}	Repetitive peak off-state voltage $T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	400	600	700	800	V

A8. TABLA DE PRESION VS TEMPERATURA PARA OBTENER VAPOR SATURADO

PRESSURE VS TEMPERATURE FOR SATURATED STEAM

psia	InHg	°F	Bar	kPa	°C	psia	psig	°F	Bar	kPa	°C
1.5	2.95	114.5	0.10	10	45.8	17.1	2.4	219.7	1.18	117.9	104.3
2.2	4.44	129.3	0.15	15	54.1	17.2	2.5	219.9	1.18	118.6	104.4
2.9	5.90	140.2	0.20	20	60.1	17.2	2.5	220.1	1.19	118.6	104.5
3.6	7.39	149.1	0.25	25	65.0	17.3	2.6	220.3	1.19	119.3	104.6
4.4	8.86	156.4	0.30	30	68.9	17.4	2.7	220.5	1.20	120.0	104.7
5.1	10.34	162.9	0.35	35	72.7	17.4	2.7	220.6	1.20	120.0	104.8
5.8	11.81	168.6	0.40	40	75.9	17.5	2.8	220.8	1.20	120.4	104.9
6.5	13.30	173.8	0.45	45	78.8	17.5	2.8	221.0	1.21	120.7	105.0
7.3	14.76	178.4	0.50	50	81.3	17.6	2.9	221.2	1.21	121.3	105.1
						17.7	3.0	221.4	1.22	122.0	105.2
						17.7	3.0	221.5	1.22	122.0	105.3
14.7	0.0	212.0	1.01	101.3	100.0	17.8	3.1	221.7	1.23	122.7	105.4
14.8	0.1	212.2	1.02	101.7	100.1	17.8	3.1	221.9	1.23	122.7	105.5
14.8	0.1	212.4	1.02	102.1	100.2	17.9	3.2	222.1	1.23	123.4	105.6
14.9	0.2	212.5	1.02	102.4	100.3	18.0	3.3	222.3	1.24	124.1	105.7
14.9	0.2	212.7	1.03	102.8	100.4	18.0	3.3	222.4	1.24	124.1	105.8
15.0	0.3	212.9	1.03	103.2	100.5	18.1	3.4	222.6	1.24	124.7	105.9
15.0	0.3	213.1	1.04	103.6	100.6	18.2	3.5	222.8	1.25	125.1	106.0
15.1	0.4	213.3	1.04	104.0	100.7	18.2	3.5	223.0	1.26	125.5	106.1
15.1	0.4	213.4	1.04	104.3	100.8	18.3	3.6	223.2	1.26	126.0	106.2
15.2	0.5	213.6	1.05	104.7	100.9	18.3	3.6	223.3	1.26	126.2	106.3
15.2	0.5	213.8	1.05	105.1	101.0	18.4	3.7	223.5	1.27	126.8	106.4
15.3	0.6	214.0	1.05	105.4	101.1	18.5	3.8	223.7	1.27	127.2	106.5
15.4	0.7	214.2	1.06	105.8	101.2	18.5	3.8	223.9	1.28	127.7	106.6
15.4	0.7	214.3	1.06	106.2	101.3	18.6	3.9	224.1	1.28	128.1	106.7
15.5	0.8	214.5	1.07	106.6	101.4	18.6	3.9	224.2	1.29	128.5	106.8
15.5	0.8	214.7	1.07	106.9	101.5	18.7	4.0	224.4	1.29	129.0	106.9
15.6	0.9	214.9	1.07	107.3	101.6	18.8	4.1	224.6	1.29	129.6	107.0
15.6	0.9	215.1	1.08	107.7	101.7	18.9	4.2	224.8	1.30	129.9	107.1
15.7	1.0	215.2	1.08	108.1	101.8	18.9	4.2	225.0	1.30	130.4	107.2
15.7	1.0	215.4	1.08	108.4	101.9	19.0	4.3	225.1	1.31	130.8	107.3
15.8	1.1	215.6	1.09	108.8	102.0	19.0	4.3	225.3	1.31	131.3	107.4
15.8	1.1	215.8	1.09	109.2	102.1	19.1	4.4	225.5	1.32	131.7	107.5
15.9	1.2	216.0	1.10	109.6	102.2	19.2	4.5	225.7	1.32	132.2	107.6
16.0	1.3	216.3	1.10	110.0	102.4	19.3	4.6	225.9	1.33	132.6	107.7
16.1	1.4	216.5	1.11	110.7	102.5	19.3	4.6	226.0	1.33	133.1	107.8
16.1	1.4	216.7	1.11	111.1	102.6	19.4	4.7	226.2	1.34	133.5	107.9
16.2	1.5	216.9	1.12	111.5	102.7	19.4	4.7	226.4	1.34	134.0	108.0
16.2	1.5	217.0	1.12	111.9	102.8	19.5	4.8	226.6	1.34	134.4	108.1
16.3	1.6	217.2	1.12	112.3	102.9	19.6	4.9	226.8	1.35	134.9	108.2
16.4	1.7	217.4	1.13	112.7	103.0	19.6	4.9	226.9	1.35	135.3	108.3
16.4	1.7	217.6	1.13	113.1	103.1	19.7	5.0	227.1	1.36	135.8	108.4
16.5	1.8	217.8	1.14	113.5	103.2	19.8	5.1	227.3	1.36	136.2	108.5
16.5	1.8	217.9	1.14	114.0	103.3	19.8	5.1	227.5	1.37	136.7	108.6
16.6	1.9	218.1	1.14	114.3	103.4	19.9	5.2	227.7	1.37	137.1	108.7
16.6	1.9	218.3	1.15	114.7	103.5	19.9	5.2	227.8	1.38	137.6	108.8
16.7	2.0	218.5	1.15	115.1	103.6	20.0	5.3	228.0	1.38	138.1	108.9
16.8	2.1	218.7	1.16	115.6	103.7	20.1	5.4	228.2	1.39	138.5	109.0
16.8	2.1	218.8	1.16	116.0	103.8	20.2	5.5	228.4	1.39	139.0	109.1
16.9	2.2	219.0	1.16	116.3	103.9	20.3	5.6	228.6	1.39	139.5	109.2
16.9	2.2	219.2	1.17	116.7	104.0	20.3	5.6	228.7	1.40	140.0	109.3
17.0	2.3	219.4	1.17	117.1	104.1	20.4	5.7	228.9	1.40	140.5	109.4
17.1	2.4	219.6	1.18	117.5	104.2	20.4	5.7	229.1	1.41	140.9	109.5

psia	psig	°F	Bar	kPa	°C	psia	psig	°F	Bar	kPa	°C
20.5	5.8	229.3	1.41	141.4	109.6	24.6	9.9	239.2	1.70	169.7	115.1
20.6	5.9	229.5	1.42	142.0	109.7	24.7	10.0	239.4	1.70	170.2	115.2
20.6	5.9	229.6	1.42	142.4	109.8	24.7	10.0	239.5	1.71	170.8	115.3
20.7	6.0	229.8	1.43	142.9	109.9	24.8	10.1	239.7	1.71	171.3	115.4
20.8	6.1	230.0	1.43	143.3	110.0	24.9	10.2	239.9	1.72	171.8	115.5
20.9	6.2	230.2	1.44	143.9	110.1	25.0	10.3	240.1	1.72	172.4	115.6
21.0	6.3	230.4	1.44	144.3	110.2	25.1	10.4	240.3	1.73	173.1	115.7
21.0	6.3	230.5	1.45	144.8	110.3	25.2	10.5	240.4	1.74	173.6	115.8
21.1	6.4	230.7	1.45	145.3	110.4	25.3	10.6	240.6	1.74	174.1	115.9
21.1	6.4	230.9	1.46	145.8	110.5	25.3	10.6	240.8	1.75	174.7	116.0
21.2	6.5	231.1	1.46	146.2	110.6	25.4	10.7	241.0	1.75	175.3	116.1
21.3	6.6	231.3	1.47	146.7	110.7	25.5	10.8	241.2	1.76	175.9	116.2
21.3	6.6	231.4	1.47	147.2	110.8	25.6	10.9	241.3	1.76	176.4	116.3
21.4	6.7	231.6	1.48	147.7	110.9	25.7	11.0	241.5	1.77	177.0	116.4
21.5	6.8	231.8	1.48	148.2	111.0	25.8	11.1	241.7	1.78	177.6	116.5
21.6	6.9	232.0	1.49	148.6	111.1	25.9	11.2	241.9	1.78	178.2	116.6
21.7	7.0	232.2	1.49	149.6	111.2	25.9	11.2	242.1	1.79	178.7	116.7
21.7	7.0	232.3	1.50	149.6	111.3	26.0	11.3	242.2	1.79	179.3	116.8
21.8	7.1	232.5	1.50	150.3	111.4	26.1	11.4	242.4	1.80	180.0	116.9
21.9	7.2	232.7	1.51	151.0	111.5	26.2	11.5	242.6	1.80	180.5	117.0
21.9	7.2	232.9	1.51	151.0	111.6	26.3	11.6	242.8	1.81	181.1	117.1
22.0	7.3	233.1	1.52	151.7	111.7	26.4	11.7	243.0	1.82	181.6	117.2
22.1	7.4	233.2	1.52	152.2	111.8	26.4	11.7	243.1	1.82	182.2	117.3
22.1	7.4	233.4	1.53	152.7	111.9	26.5	11.8	243.3	1.83	182.8	117.4
22.2	7.5	233.6	1.53	153.2	112.0	26.6	11.9	243.5	1.83	183.4	117.5
22.3	7.6	233.8	1.54	153.8	112.1	26.7	12.0	243.7	1.84	184.0	117.6
22.4	7.7	234.0	1.54	154.3	112.2	26.8	12.1	243.9	1.85	184.5	117.7
22.4	7.7	234.1	1.55	154.8	112.3	26.8	12.1	244.0	1.85	185.1	117.8
22.5	7.8	234.3	1.55	155.3	112.4	26.9	12.2	244.2	1.86	185.7	117.9
22.6	7.9	234.5	1.56	155.8	112.5	27.0	12.3	244.4	1.86	186.3	118.0
22.7	8.0	234.7	1.56	156.3	112.6	27.1	12.4	244.6	1.87	186.9	118.1
22.8	8.1	234.9	1.57	156.8	112.7	27.2	12.5	244.8	1.88	187.5	118.2
22.8	8.1	235.0	1.57	157.3	112.8	27.3	12.6	244.9	1.88	188.2	118.3
22.9	8.2	235.2	1.58	157.9	112.9	27.4	12.7	245.1	1.89	188.8	118.4
23.0	8.3	235.4	1.58	158.4	113.0	27.5	12.8	245.3	1.89	189.4	118.5
23.1	8.4	235.6	1.59	158.9	113.1	27.6	12.9	245.5	1.90	190.0	118.6
23.1	8.4	235.8	1.59	159.4	113.2	27.7	13.0	245.7	1.91	190.6	118.7
23.2	8.5	235.9	1.60	159.9	113.3	27.7	13.0	245.8	1.91	191.2	118.8
23.3	8.6	236.1	1.60	160.4	113.4	27.8	13.1	246.0	1.92	191.8	118.9
23.4	8.7	236.3	1.61	160.0	113.5	27.9	13.2	246.2	1.92	192.4	119.0
23.4	8.7	236.5	1.62	161.5	113.6	28.0	13.3	246.4	1.93	193.0	119.1
23.5	8.8	236.7	1.62	162.1	113.7	28.1	13.4	246.6	1.94	193.7	119.2
23.6	8.9	236.8	1.63	162.6	113.8	28.2	13.5	246.7	1.94	194.3	119.3
23.7	9.0	237.0	1.63	163.1	113.9	28.3	13.6	246.9	1.95	194.9	119.4
23.7	9.0	237.2	1.64	163.7	114.0	28.4	13.7	247.1	1.95	195.5	119.5
23.8	9.1	237.4	1.64	164.2	114.1	28.5	13.8	247.3	1.96	196.1	119.6
23.9	9.2	237.6	1.65	164.8	114.2	28.6	13.9	247.5	1.97	196.7	119.7
24.0	9.3	237.7	1.65	165.3	114.3	28.6	13.9	247.6	1.97	197.3	119.8
24.1	9.4	237.9	1.66	165.9	114.4	28.7	14.0	247.8	1.98	197.9	119.9
24.1	9.4	238.1	1.66	166.4	114.5	28.8	14.1	248.0	1.99	198.5	120.0
24.2	9.5	238.3	1.67	167.0	114.6	28.9	14.2	248.2	1.99	199.2	120.1
24.3	9.6	238.5	1.67	167.5	114.7	29.0	14.3	248.4	2.00	199.8	120.2
24.4	9.7	238.6	1.68	168.0	114.8	29.1	14.4	248.5	2.00	200.5	120.3
24.4	9.7	238.8	1.69	168.6	114.9	29.2	14.5	248.7	2.01	201.1	120.4
24.5	9.8	239.0	1.69	169.1	115.0	29.3	14.6	248.9	2.02	201.8	120.5

psia	psig	°F	Bar	kPa	°C	psia	psig	°F	Bar	kPa	°C
29.4	14.7	249.1	2.02	202.4	120.6	34.6	19.9	258.6	2.39	238.7	125.9
29.5	14.8	249.3	2.03	203.1	120.7	34.7	20.0	258.8	2.39	239.4	126.0
29.5	14.8	249.4	2.04	203.7	120.8	34.8	20.1	259.0	2.40	240.2	126.1
29.6	14.9	249.6	2.04	204.4	120.9	34.9	20.2	259.2	2.41	240.9	126.2
29.7	15.0	249.8	2.05	205.0	121.0	35.0	20.3	259.3	2.42	241.6	126.3
29.8	15.3	250.0	2.06	205.7	121.1	35.1	20.4	259.5	2.42	242.3	126.4
29.9	15.4	250.2	2.06	206.3	121.2	35.3	20.6	259.7	2.43	243.1	126.5
30.0	15.5	250.3	2.07	207.0	121.3	35.4	20.7	259.9	2.44	243.8	126.6
30.1	15.6	250.5	2.08	207.6	121.4	35.5	20.8	260.1	2.45	244.5	126.7
30.3	15.6	250.7	2.08	208.3	121.5	35.6	20.9	260.2	2.45	245.3	126.8
30.5	15.8	250.9	2.09	208.9	121.6	35.7	21.0	260.4	2.46	246.0	126.9
30.5	15.8	251.1	2.10	209.6	121.7	35.8	21.1	260.6	2.47	246.8	127.0
30.6	15.9	251.2	2.10	210.2	121.8	35.9	21.2	260.8	2.48	247.6	127.1
30.7	16.0	251.4	2.11	210.8	121.9	36.0	21.3	261.0	2.48	248.3	127.2
30.8	16.1	251.6	2.11	211.5	122.0	36.1	21.4	261.1	2.49	249.1	127.3
31.0	16.3	251.8	2.12	212.1	122.1	36.2	21.5	261.3	2.50	249.9	127.4
31.0	16.3	252.0	2.13	212.8	122.2	36.5	21.8	261.5	2.51	250.6	127.5
31.1	16.4	252.1	2.13	213.5	122.3	36.5	21.8	261.7	2.51	251.4	127.6
31.2	16.5	252.3	2.14	214.2	122.4	36.6	21.9	261.9	2.52	252.2	127.7
31.3	16.6	252.5	2.15	214.8	122.5	36.7	22.0	262.0	2.53	252.9	127.8
31.4	16.7	252.7	2.16	215.2	122.6	36.8	22.1	262.2	2.54	253.7	127.9
31.5	16.8	252.9	2.16	216.2	122.7	36.9	22.2	262.4	2.54	254.5	128.0
31.6	16.9	253.0	2.17	216.9	122.8	37.0	22.3	262.6	2.55	255.2	128.1
31.7	17.0	253.2	2.18	217.6	122.9	37.1	22.4	262.8	2.56	256.0	128.2
31.8	17.1	253.4	2.18	218.3	123.0	37.2	22.5	262.9	2.57	256.8	128.3
31.8	17.1	253.6	2.19	218.9	123.1	37.4	22.7	263.1	2.58	257.5	128.4
31.9	17.2	253.8	2.20	219.6	123.2	37.5	22.8	263.3	2.58	258.3	128.5
32.0	17.3	253.9	2.20	220.3	123.3	37.6	22.9	263.5	2.59	259.1	128.6
32.1	17.4	254.1	2.21	221.0	123.4	37.7	23.0	263.7	2.60	259.8	128.7
32.2	17.5	254.3	2.22	221.7	123.5	37.8	23.1	263.8	2.61	260.6	128.8
32.3	17.6	254.5	2.22	222.4	123.6	37.9	23.2	264.0	2.61	261.4	128.9
32.4	17.7	254.7	2.23	223.1	123.7	38.0	23.3	264.2	2.62	262.2	129.0
32.5	17.8	254.8	2.24	223.7	123.8	38.1	23.4	264.4	2.63	263.0	129.1
32.6	17.9	255.0	2.24	224.4	123.9	38.3	23.6	264.6	2.64	263.8	129.2
32.6	17.9	255.2	2.25	225.1	124.0	38.4	23.7	264.7	2.65	264.6	129.3
32.7	18.0	255.4	2.26	225.8	124.1	38.5	23.8	264.9	2.65	265.4	129.4
32.8	18.1	255.6	2.26	226.5	124.2	38.6	23.9	265.1	2.66	266.2	129.5
32.9	18.2	255.7	2.27	227.2	124.3	38.7	24.0	265.3	2.67	267.0	129.6
33.0	18.3	255.9	2.28	227.9	124.4	38.8	24.1	265.5	2.68	267.8	129.7
33.1	18.4	256.1	2.29	228.6	124.5	39.0	24.3	265.6	2.69	268.6	129.8
33.3	18.6	256.3	2.29	229.3	124.6	39.1	24.4	265.8	2.69	269.4	129.9
33.4	18.7	256.5	2.30	230.0	124.7	39.2	24.5	266.0	2.70	270.3	130.0
33.5	18.8	256.6	2.31	230.7	124.8	39.3	24.6	266.2	2.71	271.1	130.1
33.6	18.9	256.8	2.31	231.5	124.9	39.4	24.7	266.4	2.72	271.9	130.2
33.7	19.0	257.0	2.32	232.2	125.0	39.5	24.8	266.5	2.73	272.7	130.3
33.8	19.1	257.2	2.33	232.9	125.1	39.7	25.0	266.7	2.73	273.5	130.4
33.9	19.2	257.4	2.34	233.6	125.2	39.8	25.1	266.9	2.74	274.3	130.5
34.0	19.3	257.5	2.34	234.4	125.3	39.9	25.2	267.1	2.75	275.1	130.6
34.1	19.4	257.7	2.35	235.1	125.4	40.0	25.3	267.3	2.76	275.9	130.7
34.2	19.5	257.9	2.36	235.8	125.5	40.1	25.4	267.4	2.77	276.7	130.8
34.3	19.6	258.1	2.37	236.5	125.6	40.3	25.6	267.6	2.78	277.5	130.9
34.4	19.7	258.3	2.37	237.3	125.7	40.4	25.7	267.8	2.78	278.3	131.0
34.5	19.8	258.4	2.38	238.0	125.8	40.5	25.8	268.0	2.79	279.1	131.1

psia	psig	°F	Bar	kPa	°C	psia	psig	°F	Bar	kPa	°C
40.6	25.9	268.2	2.80	280.0	131.2	45.7	31.2	275.4	3.15	315.0	135.2
40.7	26.0	268.3	2.81	280.9	131.3	45.8	31.3	275.5	3.16	315.9	135.3
40.9	26.2	268.5	2.82	281.7	131.4	45.9	31.5	275.7	3.17	316.8	135.4
41.0	26.3	268.7	2.83	282.6	131.5	46.1	31.6	275.9	3.18	317.7	135.5
41.1	26.4	268.9	2.83	283.4	131.6	46.2	31.7	276.1	3.19	318.6	135.6
41.2	26.5	269.1	2.84	284.3	131.7	46.3	31.9	276.2	3.20	319.5	135.7
41.4	26.7	269.2	2.85	285.1	131.8	46.5	32.0	276.4	3.20	320.5	135.8
41.5	26.8	269.4	2.86	286.0	131.9	46.6	32.1	276.6	3.21	321.4	135.9
41.6	26.9	269.6	2.87	286.8	132.0	46.8	32.3	276.8	3.22	322.4	136.0
41.7	27.0	269.8	2.88	287.7	132.1	46.9	32.4	277.0	3.23	323.3	136.1
41.8	27.1	270.0	2.89	288.5	132.2	47.0	32.6	277.2	3.24	324.3	136.2
42.0	27.3	270.1	2.89	289.4	132.3	47.2	32.7	277.3	3.25	325.2	136.3
42.1	27.4	270.3	2.90	290.2	132.4	47.3	32.8	277.5	3.26	326.2	136.4
42.2	27.5	270.5	2.91	291.1	132.5	47.4	33.0	277.7	3.27	327.1	136.5
42.3	27.6	270.7	2.92	291.9	132.6	47.6	33.1	277.9	3.28	328.1	136.6
42.5	27.8	270.9	2.93	292.8	132.7	47.7	33.2	278.1	3.29	329.0	136.7
42.6	27.9	271.0	2.94	293.6	132.8	47.9	33.3	278.2	3.30	330.0	136.8
42.7	28.0	271.2	2.94	294.5	132.9	48.0	33.3	278.4	3.31	330.9	136.9
42.8	28.1	271.4	2.95	295.4	133.0	48.1	33.4	278.6	3.32	331.9	137.0
43.0	28.3	271.6	2.96	296.2	133.1	48.3	33.6	278.8	3.33	332.8	137.1
43.1	28.4	271.8	2.97	297.1	133.2	48.4	33.7	279.0	3.34	333.8	137.2
43.2	28.5	271.9	2.98	297.9	133.3	48.5	33.8	279.1	3.35	334.7	137.3
43.3	28.6	272.1	2.99	298.8	133.4	48.7	34.0	279.3	3.36	335.6	137.4
43.5	28.8	272.3	3.00	299.7	133.5	48.8	34.1	279.5	3.37	336.6	137.5
43.6	28.9	272.5	3.01	300.6	133.6	49.0	34.3	279.7	3.38	337.5	137.6
43.7	29.0	272.7	3.01	301.5	133.7	49.1	34.4	279.9	3.38	338.5	137.7
43.9	29.2	272.8	3.02	302.4	133.8	49.2	34.5	280.0	3.39	339.4	137.8
44.0	29.3	273.0	3.03	303.3	133.9	49.4	34.7	280.2	3.40	340.4	137.9
44.1	29.4	273.2	3.04	304.2	134.0	49.5	34.8	280.4	3.41	341.4	138.0
44.2	29.5	273.4	3.05	305.1	134.1	49.7	35.0	280.6	3.42	342.4	138.1
44.4	29.7	273.6	3.06	306.0	134.2	49.8	35.1	280.8	3.43	343.4	138.2
44.5	29.8	273.7	3.07	306.9	134.3	49.9	35.2	280.9	3.44	344.4	138.3
44.6	29.9	273.9	3.08	307.8	134.4	50.1	35.4	281.1	3.45	345.4	138.4
44.8	30.1	274.1	3.09	308.7	134.5	50.2	35.5	281.3	3.46	346.4	138.5
44.9	30.2	274.3	3.10	309.6	134.6	50.4	35.7	281.5	3.47	347.4	138.6
45.0	30.3	274.5	3.10	310.5	134.7	50.6	35.9	281.7	3.48	348.4	138.7
45.2	30.5	274.6	3.11	311.4	134.8	50.7	36.0	281.8	3.49	349.4	138.8
45.3	30.6	274.8	3.12	312.3	134.9	50.8	36.1	282.0	3.50	350.4	138.9
45.4	30.7	275.0	3.13	313.2	135.0	51.0	36.3	282.2	3.51	351.4	139.0
45.6	31.1	275.2	3.14	314.1	135.1	51.1	36.4	282.4	3.52	352.4	139.1

Legend:
psia — absolute pressure in psi
Psig — gauge pressure in psi
kPa — absolute pressure in kilo-Pascal
InHg — pressure (vacuum) in inch-Mercury