

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica



**Automatización de Proceso de Caracterización de niveles de  
Hidrógeno en Materiales para el Centro de Investigación y  
Extensión en Ingeniería de los Materiales**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Kevin David Solano Carranza

Cartago, 6 de febrero de 2025

Este trabajo tiene licencia bajo CC BY-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Kevin David Solano Carranza

Cartago, 6 de febrero de 2025 Céd: 2-0795-0263

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Kevin David Solano Carranza

Proyecto: Automatización de Proceso de Caracterización de niveles de Hidrógeno en Materiales para el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales.



---

Dr. -Ing. Yeiner Arias  
Esquivel  
Asesor

Cartago, 6 de febrero del 2025

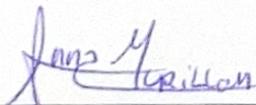
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Kevin David Solano Carranza

Proyecto: Automatización de Proceso de Caracterización de niveles de Hidrógeno en Materiales para el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales.

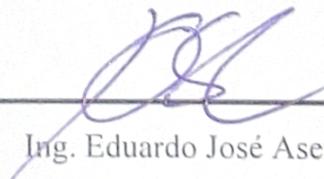
Miembros del jurado evaluador



---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado



---

Ing. Eduardo José Asenjo Castillo

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 6 de febrero del 2025

# Resumen

El presente proyecto se centra en la automatización de un sistema de control de presión y temperatura en el laboratorio de CIEMTEC, diseñado específicamente para la caracterización de materiales en términos de absorción de hidrógeno. El sistema incluye una cámara de prueba conectada a un manifold y varias válvulas, controladas mediante un microcontrolador y tiene una interfaz de usuario para supervisar y controlar en tiempo real la presión, temperatura y flujo de hidrógeno.

Dado que el sistema es nuevo, se ha desarrollado una justificación estadística para definir la cantidad mínima de pruebas necesarias para obtener resultados confiables y representativos, asegurando que los datos recopilados sean válidos para la evaluación del sistema.

Este proyecto integra tecnología de control y monitoreo de precisión, buscando desarrollar un sistema robusto que permita caracterizar materiales de manera eficiente en un entorno controlado y seguro. La automatización contribuye a minimizar la intervención humana y mejora la confiabilidad de los resultados.

**Palabras clave:** Automatización, Equipo PCT, Control de Presión, Control de Temperatura, Control de Válvulas, Control por Histéresis, Diseño Mecánico, Hidrógeno, Purga, Vacío, Absorción/Desorción, Caracterización de Material.

# Abstract

The present project focuses on the automation of a pressure and temperature control system in the CIEMTEC laboratory, specifically designed for material characterization in terms of hydrogen absorption. The system includes a test chamber connected to a manifold and several valves, controlled by a microcontroller, and features a user interface to monitor and control pressure, temperature, and hydrogen flow in real-time.

Since the system is new, a statistical justification has been developed to determine the minimum number of tests needed to obtain reliable and representative results, ensuring that the collected data is valid for system evaluation.

This project integrates precision control and monitoring technology, aiming to develop a robust system that enables efficient material characterization in a controlled and safe environment. Automation helps minimize human intervention and improves results reliability.

**Keywords:** Automation, PCT Equipment, Pressure Control, Temperature Control, Valve Control, Hysteresis Control, Mechanical Design, Hydrogen, Purge, Vacuum, Absorption / Desorption, Material Characterization.

*Dedicatoria especial a mis queridos padres, quienes me han apoyado incondicionalmente. A mi madre, quien me ha enseñado a confiar en mí, ¡Sí se pudo ma!. A mi padre, quien me ha enseñado que la paciencia es fundamental en la vida. Ambos han sido pilares fundamentales en mi desarrollo, no solo profesionalmente, sino como persona. También le dedico este proyecto a mi hermano postizo Davide Canuti, quien ha sido siempre un guía para mí y sus consejos me han motivado en la vida.*

# Agradecimientos

A mis compañeros, en especial a Randy Mora, Armando Alvarado, Nadir Alfaro y Santiago Ramírez, con los que tuve la suerte de compartir la mayor parte de la carrera, que me impulsaron a mejorar mi desempeño y a dar lo mejor de mí en los estudios, además de que hicieron de esta experiencia algo inolvidable. Gracias por ayudarme a crecer no solo como profesional sino como persona. Aunque la vida nos lleve por rumbos diferentes, más que compañeros, me llevo amigos. Además, quiero agradecer a Esteban Mata, cuyos aportes fueron vitales en el desarrollo de este proyecto y mejoró considerablemente esta experiencia. En general a mis amigos, con quienes he compartido risas, desafíos y momentos inolvidables, les agradezco por su amistad y por ser un pilar de apoyo en los momentos más difíciles.

Finalmente, el agradecimiento más grande a mi familia, especialmente a mis padres, a mi hermano y a mi abuela, por ser un apoyo incondicional y por darme las fuerzas para seguir avanzando durante los momentos más difíciles, no solo de la carrera, sino también de la vida.

Kevin David Solano Carranza

Cartago, 6 de febrero de 2025

# Índice general

<b>Lista de símbolos y abreviaciones</b>	<b>x</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Entorno del proyecto . . . . .	1
1.2 Definición del problema . . . . .	1
1.2.1 Generalidades . . . . .	1
1.2.2 Justificación . . . . .	3
1.2.3 Diagrama de Ishikawa . . . . .	3
1.2.4 Síntesis del problema . . . . .	4
1.3 Limitaciones del proyecto . . . . .	4
1.4 Objetivo general . . . . .	4
1.5 Objetivos específicos . . . . .	5
1.6 Estructura del documento . . . . .	5
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1 Caracterización de Materiales mediante Variación de Presiones . . . . .	6
2.1.1 Métodos de caracterización . . . . .	7
2.1.2 Caracterización por hidrógeno . . . . .	7
2.1.3 Material de prueba . . . . .	8
2.1.4 Automatización de procesos en la industria . . . . .	9
2.1.5 Dispositivos en el mercado . . . . .	12
2.2 Sistema de válvulas . . . . .	15
2.3 Control de Presión y Temperatura . . . . .	16
2.3.1 Presión . . . . .	16
2.3.2 Temperatura . . . . .	17
2.3.3 Control PID . . . . .	17
2.3.4 Control ON/OFF con histéresis . . . . .	19
2.4 Comunicación entre dispositivos . . . . .	19
2.4.1 Comunicación PC-Controladores . . . . .	19
<b>3 Metodología</b>	<b>21</b>
3.1 Pasos de la metodología . . . . .	21
3.2 Identificación de necesidades . . . . .	22
3.2.1 Reflexión . . . . .	24
3.3 Generación de métricas y establecimiento de valores objetivo . . . . .	25

3.3.1	Reflexión . . . . .	29
3.4	Generación de conceptos . . . . .	30
3.4.1	Reflexión . . . . .	34
3.5	Selección de concepto . . . . .	35
3.5.1	Interfaz de control . . . . .	35
3.5.2	Control de presión y temperatura . . . . .	40
3.5.3	Control de válvulas . . . . .	45
3.5.4	Reflexión . . . . .	48
3.6	Concepto ganador . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Diseño del sistema automatizado</b>	<b>51</b>
4.1	Diseño de interfaz de control . . . . .	51
4.1.1	Identificación de requerimientos . . . . .	51
4.1.2	Escogencia de entorno de programación . . . . .	52
4.1.3	Proceso de limpieza del sistema . . . . .	55
4.1.4	Proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales . . . . .	57
4.1.5	Proceso de prueba de pérdidas de presión . . . . .	59
4.2	Diseño del control de válvulas . . . . .	60
4.2.1	Selección de válvulas . . . . .	60
4.2.2	Selección de controlador . . . . .	63
4.3	Diseño de control de presión . . . . .	64
4.3.1	Selección de control de presión . . . . .	64
4.3.2	Control por histéresis . . . . .	65
4.3.3	Selección del sensor de presión . . . . .	66
4.4	Control de temperaturas . . . . .	67
4.4.1	Selección de control de temperatura . . . . .	67
4.5	Diseño mecánico . . . . .	69
4.5.1	Diseño de carcasa . . . . .	69
4.5.2	Cambio de manguera . . . . .	70
4.6	Seguridad en el sistema . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>74</b>
5.1	Estrategias de validación . . . . .	77
5.1.1	Reducción de tiempo y estado de válvulas . . . . .	77
5.1.2	Tiempo de respuesta de las válvulas y disminución de desperdicios de hidrógeno . . . . .	79
5.1.3	Variabilidad de resultados . . . . .	80
5.2	Resultados de validación . . . . .	81
5.2.1	Reducción de tiempo . . . . .	81
5.2.2	Tiempo de respuesta de las válvulas y disminución de desperdicios de hidrógeno . . . . .	84
5.2.3	Variabilidad de resultados . . . . .	85
5.3	Análisis económico . . . . .	87

---

<b>6 Conclusiones y trabajos a futuro</b>	<b>94</b>
6.1 Conclusiones . . . . .	94
6.2 Trabajos a futuro . . . . .	96
6.2.1 Detección de fugas . . . . .	96
6.2.2 Ventilación . . . . .	96
6.2.3 Equipo de protección personal (EPP) . . . . .	96
6.2.4 Mantenimiento preventivo . . . . .	97
6.2.5 Bomba de vacío . . . . .	97
<b>A Formulario de clasificación de importancia de necesidades interpretadas</b>	<b>103</b>
<b>B Conceptos generados</b>	<b>109</b>
<b>C Diagnóstico Equipo PCT y utilización del sistema</b>	<b>113</b>
<b>D Código implementado en la solución</b>	<b>120</b>
D.1 Código Arduino . . . . .	121
D.2 Código Python . . . . .	122
D.3 Código Matlab . . . . .	124
D.3.1 Scripts . . . . .	124
D.3.2 App Designer . . . . .	128
<b>E Planos</b>	<b>141</b>
E.1 Conexiones válvulas . . . . .	142
E.2 Conexiones microcontrolador . . . . .	144
E.3 Carcasa . . . . .	146
<b>F Validación y pruebas iniciales al sistema</b>	<b>153</b>
<b>G Manual de usuario</b>	<b>157</b>
<b>H Informe de validación</b>	<b>189</b>
<b>I Encuesta Facilidad de Uso de Interfaz</b>	<b>243</b>

# Índice de figuras

1.1	Diagrama de Causa-Raíz para el problema planteado. . . . .	4
2.1	Aparato de tipo Sieverts de bajo coste para el estudio de reacciones de hidru- ración/deshiduración construido en la UNAM, México. . . . .	11
2.2	Equipo PCT presente en el laboratorio. . . . .	11
2.3	Diagrama del sistema de absorción volumétrica de hidrógeno actual ubicado en el CIEMTEC. . . . .	12
2.4	GASPRO Setaram. . . . .	13
2.5	IMI-HTP. . . . .	13
2.6	Espectrómetro de masa QGA. . . . .	14
2.7	Pfeiffer Vacuum Capilar. . . . .	15
2.8	FTIR. . . . .	15
3.1	Fases de la metodología para el desarrollo del concepto. . . . .	22
3.2	Diagrama de primer nivel del subproblema Interfaz de Control . . . . .	30
3.3	Diagrama de primer nivel del subproblema Control de Presión y Temperatura	31
3.4	Diagrama de primer nivel del subproblema Control de Válvulas . . . . .	31
3.5	Diagrama de segundo nivel del subproblema Interfaz de Control. . . . .	32
3.6	Diagrama de segundo nivel del subproblema Control de Presión y Temperatura.	32
3.7	Diagrama de segundo nivel del subproblema Control de Válvulas. . . . .	33
3.8	Boceto del concepto ganador. . . . .	50
4.1	Interfaz del sistema manual basada en HTML y JavaScript. . . . .	52
4.2	Interfaz del sistema automático, pestaña de conexiones. . . . .	53
4.3	Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de control de válvulas y bomba de vacío. . . . .	54
4.4	Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de control de temperaturas.	54
4.5	Diagramas de flujo de los procesos de detención de actuadores del sistema. . .	55
4.6	Diagrama de flujo del proceso de purga del sistema . . . . .	56
4.7	Interfaz del sistema automático, pestaña de purga del sistema. . . . .	56
4.8	Diagrama de flujo del proceso de caracterización del material. . . . .	57
4.9	Interfaz del sistema automático, pestaña de caracterización de material. . . .	58
4.10	Interfaz del sistema automático, pestaña de gráficas, presión y temperaturas en el sistema. . . . .	58
4.11	Diagrama de flujo del proceso de prueba de pérdida de presión. . . . .	59

4.12	Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de pérdidas de presión. . . . .	60
4.13	Manifold MiCRO. . . . .	61
4.14	Válvulas neumáticas Swagelok SS-HBS4-C. . . . .	62
4.15	Válvula de émbolo de 2/2 vías de acción directa hasta 900 bar – Tipo 6080. . . . .	62
4.16	Arduino UNO. . . . .	64
4.17	Módulo de relés de 8 canales marca SainSmart. . . . .	64
4.18	Diagrama de flujo del controlador ON-OFF por histéresis. . . . .	65
4.19	Transmisor de presión KELLER Serie 33X con interfaz RS-485. . . . .	66
4.20	Convertidor A/D K-114 con interfaz RS-485 a través de USB. . . . .	66
4.21	Sensor de presión Ashcroft G2 Cole-Palmer. . . . .	67
4.22	Sensor de presión WIKA A-10 Cole-Palmer. . . . .	67
4.23	Controlador de temperatura PID de alto rendimiento Serie TK. Autonics . . . . .	68
4.24	Termopar Tipo J Bulbo 0°C 450°C. . . . .	68
4.25	Controlador de temperatura E5CC-QX2ASM-800 de OMRON. . . . .	68
4.26	UDC3500 DIN Controller de Honeywell Industrial Automation. . . . .	69
4.27	Controlador PID de temperatura de OMEGA. . . . .	69
4.28	Carcasa contenedora de dispositivos electrónicos diseñada en SOLIDWORKS 2024. . . . .	70
4.29	Manguera plástica implementada en el sistema previo a la realización del proyecto. . . . .	70
4.30	Conexión entre tanque de hidrógeno y sistema con conexión de tubería de acero inoxidable. . . . .	71
4.31	Regulador de flujo analógico adaptado a la salida del tanque de hidrógeno. . . . .	73
5.1	Diagrama de flujo del proceso de purga del sistema realizado manualmente. . . . .	75
5.2	Pestaña de prueba de pérdidas de presión con presión simulada. . . . .	78
5.3	Pestaña de purga del sistema con presión simulada. . . . .	78
5.4	Sonda de prueba para osciloscopios de 60 MHz (atenuación x10). . . . .	79
5.5	Sensor de flujo FESTO SFAH-50V-G18FS-PNLK-PNVBA-M8. . . . .	80
A.1	Encuesta hecha al cliente parte 1. . . . .	104
A.2	Encuesta hecha al cliente parte 2. . . . .	104
A.3	Encuesta hecha al cliente parte 3. . . . .	105
A.4	Encuesta hecha al cliente parte 4. . . . .	105
A.5	Encuesta hecha al cliente parte 5. . . . .	106
A.6	Encuesta hecha al cliente parte 6. . . . .	106
A.7	Encuesta hecha al cliente parte 7. . . . .	107
A.8	Encuesta hecha al cliente parte 8. . . . .	107
A.9	Encuesta hecha al cliente parte 9. . . . .	108
B.1	Conceptos generados para la detección y procesamiento de señales de la interfaz de control. . . . .	110
B.2	Conceptos generados para procesamiento de energía de la interfaz de control. . . . .	111
B.3	Conceptos generados para el bloque de control de presión y temperatura. . . . .	111
B.4	Conceptos generados para el bloque de control válvulas. . . . .	112

D.1 Código implementado en ARDUINO UNO parte 1. . . . .	121
D.2 Código implementado en ARDUINO UNO parte 2. . . . .	121
D.3 Código implementado en Python para la comunicación con el sensor de presión.	122
D.4 Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 1. . . . .	122
D.5 Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 2. . . . .	123
D.6 Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 3. . . . .	123
D.7 Código implementado en MATLAB para control de switches. . . . .	124
D.8 Código implementado en MATLAB para control de relés individualmente parte 1. . . . .	125
D.9 Código implementado en MATLAB para control de relés individualmente parte 2. . . . .	126
D.10 Código implementado en MATLAB para control de relés parte 1. . . . .	127
D.11 Código implementado en MATLAB para control de relés parte 2. . . . .	127
D.12 Definición de propiedades parte 1. . . . .	128
D.13 Definición de propiedades parte 2. . . . .	128
D.14 Inicialización de variables parte 1. . . . .	129
D.15 Inicialización de variables parte 2. . . . .	129
D.16 Timer prueba de control de temperatura. . . . .	130
D.17 Timer para conexión con controladores de temperatura. . . . .	130
D.18 Timer para conexión con sensor de presión. . . . .	131
D.19 Timer para el proceso de prueba de pérdidas de presión parte 1. . . . .	131
D.20 Timer para el proceso de prueba de pérdidas de presión parte 2. . . . .	131
D.21 Timer para proceso de purga del sistema parte 1. . . . .	132
D.22 Timer para proceso de purga del sistema parte 2. . . . .	132
D.23 Timer para proceso de purga del sistema parte 3. . . . .	133
D.24 Programación Switch para conexión con microcontrolador. . . . .	133
D.25 Programación Switch para conexión con sensor de presión. . . . .	134
D.26 Programación Switch para conexión con controladores de temperatura. . . .	134
D.27 Programación de perilla de selección de puerto de conexión con microcontrolador. . . . .	134
D.28 Programación de perilla de selección de puerto de conexión con sensor de presión. . . . .	135
D.29 Programación de perilla de selección de puerto de conexión con controladores de temperatura. . . . .	135
D.30 Programación del botón de Stop de la pestaña de Valves Control en Testing.	135
D.31 Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 1. . . . .	135
D.32 Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 2. . . . .	136
D.33 Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 3. . . . .	136
D.34 Validación de entrada de valores de la pestaña de Temperature Control. . . .	137
D.35 Programación de botón Start de Temperature Control. . . . .	137

---

D.36 Programación de botones de Stop y Download data de Temperature Control.	137
D.37 Validación de entrada de datos de presión de las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim. . . . .	137
D.38 Validación de entrada de datos de histéresis de las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim. . . . .	138
D.39 Programación de los botnes de Start, Stop y Download data de la pestaña de Pressure Loss Sim. . . . .	138
D.40 Programación de los botnes de Start, Stop y Download data de la pestaña de System Purge Sim. . . . .	139
D.41 Programación de perillas de selección para simulación de presión en las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim. . . . .	139
D.42 Programación de opciones para acceder a las hojas de especificaciones de los dispositivos en el menú de ayuda. . . . .	140
D.43 Programación de opción de cierre de aplicación en el menú de ayuda. . . . .	140
F.1 Tabla t de student para cálculo del valor estadístico. . . . .	156
I.1 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Inicio. . . . .	244
I.2 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Accesibilidad General. . . . .	244
I.3 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Configuración y Operación. . . . .	245
I.4 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Visualización y Datos. . . . .	245
I.5 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Experiencia General. . . . .	246
I.6 Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Retroalimentación. . . . .	246

# Índice de tablas

2.1	Comparación de protocolos de comunicación. . . . .	20
3.1	Nivel de importancia con su respectivo significado. . . . .	23
3.2	Nivel de importancia con su respectivo significado. . . . .	24
3.3	Especificaciones establecidas. . . . .	26
3.4	Correspondencia de necesidades con las especificaciones de la tabla 3.2 . . . .	26
3.5	Valores objetivo establecidos. . . . .	29
3.6	Conceptos generados para la interfaz de control. . . . .	36
3.7	Criterios de selección para la interfaz de control . . . . .	38
3.8	Evaluación de conceptos para la interfaz de control . . . . .	39
3.9	Conceptos generados para el control de presión y temperatura. . . . .	40
3.10	Criterios de selección para el control de presión y temperatura . . . . .	43
3.11	Evaluación de conceptos para el control de presión y temperatura . . . . .	44
3.12	Conceptos generados para el control de válvulas. . . . .	45
3.13	Criterios de selección para el control de válvulas . . . . .	47
3.14	Evaluación de conceptos para el control de válvulas . . . . .	48
4.1	Comparación de lenguajes de programación para la creación de interfaces de control. . . . .	52
4.2	Comparación de microcontroladores para la implementación de control de válvulas. . . . .	63
4.3	Configuración de válvulas parte 1. . . . .	72
4.4	Configuración de válvulas parte 2. . . . .	72
5.1	Estado de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de pérdidas de presión con el sensor de presión simulado. . . . .	82
5.2	Estado de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de purga del sistema con el sensor de presión simulado. . . . .	83
5.3	Tiempos de respuesta de las válvulas neumáticas. . . . .	84
5.4	Tiempos de respuesta de las electroválvulas del manifold. . . . .	85
5.5	Tiempos de respuesta de las válvulas del sistema. . . . .	85
5.6	Variabilidad de resultados en control de temperatura. . . . .	86
5.7	Variabilidad de resultados. . . . .	87
5.8	Componentes del equipo manual parte 1. . . . .	88
5.9	Componentes del equipo manual parte 2. . . . .	88

---

5.10	Componentes adquiridos para la automatización previo al proyecto. . . . .	89
5.11	Componentes mecánicos adquiridos para la automatización durante el proyecto.	89
5.12	Componentes eléctricos/electrónicos adquiridos para la automatización durante el proyecto. . . . .	90
5.13	Componentes adquiridos para la automatización durante el proyecto (Total).	90
5.14	Gasto total en automatización. . . . .	91
5.15	Costo total del equipo. . . . .	91
5.16	Inversión del proyecto. . . . .	92
F.1	Resultados de tiempo de pruebas de puesta en marcha del sistema por operario.	154
F.2	Resultados de tiempo de todas las pruebas de puesta en marcha del sistema.	155
F.3	Resultados obtenidos para cantidad de pruebas a partir de la distribución t de student. . . . .	156

# Lista de símbolos y abreviaciones

## **Abreviaciones**

CEIMTEC	Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica
PCT	Pressure-Composition-Temperature
SD	Solución Deseada

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Entorno del proyecto

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR/TEC) es una universidad pública de investigación con sede central en Cartago, Costa Rica. Fundado en 1971, el TEC es la universidad estatal de tecnología más importante del país y ofrece una amplia gama de programas de pregrado, posgrado y educación continua en áreas como ingeniería, ciencia, tecnología y negocios, además de servicios industriales [1].

El Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC), fundado en 2009, es un Centro en Desarrollo del Instituto Tecnológico de Costa Rica, creado con fundamento en lo establecido en el Reglamento de Creación de Centros de Investigación y Unidades Productivas y en el Estatuto Orgánico [2]. Cuenta con un equipo de investigadores altamente calificados con experiencia en diversas áreas, como materiales nanoestructurados, biomateriales, materiales porosos y celulares, y materiales para energías limpias [3].

Este centro se dedica a la investigación y extensión científica y tecnológica, la asistencia técnica y prestación de servicios a la industria, incluyendo ensayos mecánicos, termogravimetría (TG), ensayos no destructivos (END), microscopía electrónica, difracción de rayos X, consultoría en diseño de materiales, entre otros. Sus principales áreas de investigación son la degradación y protección de materiales, caracterización de materiales y ensayos no destructivos, mecánica de materiales, y tecnologías avanzadas para el desarrollo y aplicación de materiales [3].

### 1.2 Definición del problema

#### 1.2.1 Generealidades

La línea de caracterización de materiales estudia la determinación cualitativa y cuantitativa de la composición, estructura y propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales

empleando diferentes técnicas [4]. El CIEMTEC ha invertido en la construcción de un sistema para la caracterización de niveles de hidrógeno en materiales basado en un aparato de Sievert de bajo costo.

El aparato de Sievert mide la absorción o liberación de hidrógeno monitoreando cambios de presión y temperatura. Los datos recogidos de los transductores de presión y los controladores de temperatura se utilizan para calcular la absorción/liberación de hidrógeno en porcentaje de peso (%wt) utilizando una ecuación de estado de gas real y un balance de masa [5].

El sistema incluye una cámara de muestra y una cámara de reserva de gas, ambas conectadas por una válvula neumática de acción rápida. La cámara de muestra cuenta con un transductor de presión de alta precisión y un termopar tipo T en contacto directo con la muestra. La cámara de reserva está equipada con varios transductores de presión de alta precisión y un termopar interno para medir la temperatura del gas de reserva [6].

Primeramente, se debe preparar el sistema. Se pesa la muestra y se coloca en un portamuestras limpio conectado a la válvula de diafragma. Seguidamente, se debe encender el dispositivo y la PC, y se registran datos de temperatura y presión periódicamente (cada 5 segundos). Continuando, se deben calentar los depósitos y el horno a una temperatura recomendada (296.15–298.15 K). Luego, se debe hacer un proceso de evacuación; realizar tres ciclos de vacío e ingreso de argón o gas a utilizar (0.2–0.6 MPa). A continuación, se calibra el volumen vacío, por lo que se registra presión y temperatura estables. El volumen vacío del portamuestras se calcula utilizando la ley de gases ideales. Por último, se exportan datos a Excel y se calcula la absorción/liberación de hidrógeno utilizando los datos registrados [5].

El sistema actual, ubicado en CIEMTEC, cuenta con un control completamente manual sobre el proceso repetitivo de variación de presiones y temperaturas, con el fin de ingresar y extraer el hidrógeno en el material, y así caracterizar su comportamiento. El hidrógeno extraído se intenta recuperar en su mayoría mediante la manipulación de válvulas. Además, el laboratorio cuenta con una computadora conectada al sistema, la cual permite observar valores de presión y temperatura, sin embargo, no existe un control en el sistema y el proceso es altamente dependiente de la intervención humana. Las válvulas que controlan el proceso son manipuladas por personas en un ambiente donde hay hidrógeno presente, el cual es inflamable. Además, no se cuenta con una interfaz que permita un control y monitoreo del sistema, lo que es de vital importancia para el laboratorio, ya que, dependiendo del material, el proceso de caracterización puede durar hasta varios días.

Debido a factores como el error humano, existe siempre el riesgo de que se produzca un error en el control manual del proceso, y por ende, afectar la calidad del resultado final y aumentar la cantidad de desperdicios durante la ejecución de este. Todo lo anterior ocasiona que el proceso presente también una alta variabilidad en el tiempo de ejecución e incertidumbre de resultados.

### 1.2.2 Justificación

El presente proyecto resulta de vital importancia para el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales, ya que este contribuirá significativamente a mejorar la calidad de investigación del proceso de caracterización de materiales, alcanzando así los objetivos del CIEMTEC de una forma más eficaz. La caracterización de los materiales es fundamental en la innovación de procesos de transformación de materiales en todas las actividades humanas [7].

El proceso actual de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales, que requiere una intervención manual constante para controlar válvulas y monitorear variables, presenta deficiencias significativas que impactan negativamente el desempeño del CIEMTEC. Este proceso manual y duradero, que necesita de al menos dos operarios presentes durante la mayor parte del proceso, limita la productividad, aumenta el riesgo de errores humanos y accidentes por la manipulación de hidrógeno, y genera variabilidad e incertidumbre en los resultados, afectando la calidad de las investigaciones, la reputación del CIEMTEC y los costos del proceso. La ausencia de un sistema automatizado e interfaz para controlar válvulas y regular las condiciones del proceso, limita el análisis y la gestión de la información, dificultando la correcta caracterización de los materiales. Las causas identificadas para este proyecto se encuentran en la figura 1.1.

La automatización del proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales tiene el potencial de generar una mayor productividad. Un sistema automatizado podría realizar el proceso de forma más rápida y eficiente, permitiendo analizar un mayor número de muestras por mes. La automatización eliminaría la variabilidad humana y garantizaría la precisión de las mediciones, mejorando la calidad de los datos y las investigaciones. Un sistema automatizado reduciría la necesidad de manipulación manual de válvulas y la exposición a hidrógeno, disminuyendo el riesgo de accidentes laborales y desperdicios de hidrógeno, además de que se crea la oportunidad para que el personal se pueda encargar de tareas críticas que aumenten la eficacia del proceso, y por último, se reducirían los costos operativos del laboratorio al disminuir la necesidad de personal y la repetición de mediciones manualmente.

La inversión en este proyecto se justifica por el impacto positivo que tendrá en el desempeño del laboratorio y la reputación del CIEMTEC, el cual influye significativamente en el desempeño de experimentos científicos tanto a nivel nacional como internacional, ya que gracias a estas investigaciones, el CIEMTEC ha colaborado con universidades en países como Japón, Italia e Inglaterra, además de publicar numerosos artículos de valor intelectual [8].

### 1.2.3 Diagrama de Ishikawa

En la figura 1.1 se observa un diagrama de Ishikawa construido mediante el método de las 6 M (Mano de obra, Maquinaria, Materiales, Método, Medio Ambiente y Mediciones).

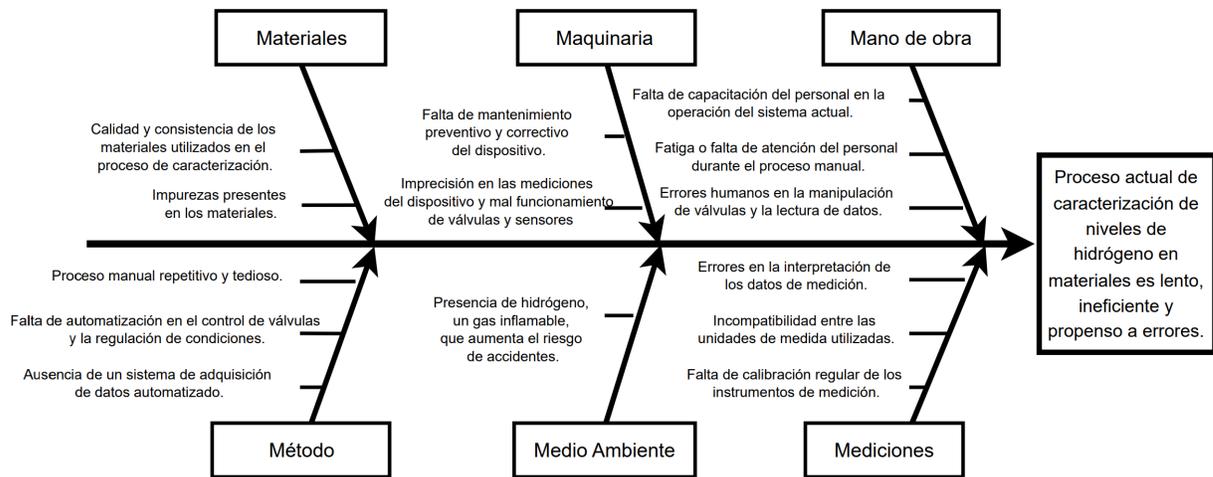


Figura 1.1: Diagrama de Causa-Raíz para el problema planteado.

### 1.2.4 Síntesis del problema

El proceso actual de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales en el CIEMTEC requiere intervención manual constante, lo que lo hace lento, ineficiente y propenso a errores. Existe una carencia de control automatizado, lo que aumenta el riesgo de errores humanos y accidentes por la manipulación de hidrógeno. Además, esto limita el análisis y la gestión de la información, dificultando la toma de decisiones, lo que, a su vez, afecta la calidad de los datos y la confiabilidad de las investigaciones. Estas deficiencias tienen un impacto negativo en el CIEMTEC debido a que se disminuye la productividad, se afecta la calidad, aumenta el riesgo de accidentes laborales y eleva los costos.

## 1.3 Limitaciones del proyecto

El requisito fundamental en la elaboración de este proyecto radica en el aprovechamiento de los recursos disponibles en el laboratorio. Desde la instrumentación especializada hasta la alimentación eléctrica, cada elemento es crucial para llevar a cabo los experimentos de manera eficiente y precisa. La utilización adecuada de estos recursos no solo garantizará la obtención de resultados confiables, sino que también contribuirá a la sostenibilidad del laboratorio y a la optimización de los costos asociados al proyecto.

## 1.4 Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado del proceso de caracterización de niveles de hidrógeno para diversos materiales en el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

## 1.5 Objetivos específicos

- Evaluar el proceso actual de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales.
- Diseñar un sistema automatizado de apertura y cierre de válvulas para la caracterización de niveles de hidrógeno en materiales.
- Desarrollar un software de control y recolección de datos para el sistema automatizado.
- Validar el sistema automatizado y el software de control.

## 1.6 Estructura del documento

Este documento se estructura en seis capítulos que abarcan las diferentes fases del proyecto.

El Capítulo 2 se dedica al marco teórico, donde se presentan los conceptos fundamentales necesarios para entender el proyecto. Dado que el público objetivo cuenta con conocimientos previos en el área, se limita a abordar las tecnologías y conceptos específicos pertinentes al proyecto.

El Capítulo 3 se centra en la metodología, comenzando por procesar la información proporcionada por el cliente para generar una lista de necesidades y métricas que reflejan los deseos de la empresa. Con base en estas necesidades, se crea una lista de conceptos potenciales que ofrecen soluciones al problema y se realiza una comparación entre ellos utilizando una matriz para seleccionar el concepto más adecuado.

Una vez definido el concepto ganador, en el Capítulo 4 se presenta una propuesta de solución que detalla la implementación del concepto seleccionado y aborda cualquier decisión que no se discutió en la sección de metodología. Este capítulo se divide en las siguientes secciones: diseño de interfaz de control, diseño de control de presión, control de temperaturas, diseño de control de válvulas, diseño mecánico y diseño lógico.

El Capítulo 5 corresponde a los resultados. La primera parte del capítulo se enfoca en la validación. Para esta, se plantean varios experimentos que se realizan en el sistema para verificar su funcionamiento y el cumplimiento de las necesidades más críticas. Los resultados de estos experimentos se analizan en la sección correspondiente. Finalmente, la última parte del capítulo incluye un análisis económico, que evalúa el proyecto desde un enfoque de recursos.

En el Capítulo 6, se reúnen los hallazgos clave del proyecto y se proponen trabajos futuros para la validación final del dispositivo, así como pruebas de campo y posibles mejoras, dependiendo de los resultados obtenidos en dichas pruebas.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

A lo largo de este capítulo, se exploran conceptos fundamentales para el entendimiento de la solución diseñada para este proyecto. Se abarcan temas como métodos de caracterización de materiales mediante variación de presiones, con un énfasis particular en el proceso de absorción y desorción de hidrógeno. Se examina cómo las propiedades del hidrógeno y su interacción con diferentes materiales, como el compuesto intermetálico  $LaNi_5$ , son fundamentales para el avance en el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles. También se discuten los equipos y dispositivos utilizados para automatizar estas caracterizaciones, así como la importancia de los controladores automáticos en la mejora del rendimiento del proceso.

### 2.1 Caracterización de Materiales mediante Variación de Presiones

La caracterización de materiales es un proceso fundamental en la ingeniería y la ciencia de los materiales, cuyo objetivo es estudiar y entender las propiedades físicas, químicas, y mecánicas de los materiales. Este conocimiento permite optimizar su uso en diversas aplicaciones industriales y de investigación [9].

Según ATRIA Innovation, la caracterización es esencial para el desarrollo de nuevos materiales y la mejora de los existentes. Al entender cómo se comportan los materiales bajo diferentes condiciones, es posible diseñar productos más eficientes y con mejores prestaciones. Esto no solo mejora la calidad, sino que también permite innovar y resolver problemas de calidad en productos ya existentes [9].

Como señala Infinitia Industrial Consulting, la caracterización de materiales es crucial para asegurar la máxima calidad en los procesos de diseño y fabricación de nuevos productos. La información obtenida a través de la caracterización permite tomar decisiones informadas durante el proceso industrial, asegurando que los materiales seleccionados cumplirán con los requisitos de resistencia, durabilidad y fiabilidad necesarios para su aplicación [10].

### 2.1.1 Métodos de caracterización

El proceso de caracterización de los niveles de hidrógeno en materiales implica estudiar cómo un material puede absorber y liberar el gas bajo ciertas condiciones, lo que es esencial en la investigación de almacenamiento de hidrógeno. Este proceso se divide en dos partes principales: absorción y desorción [6].

Existen dos métodos para caracterizar la capacidad de absorción y desorción de hidrógeno en materiales: gravimétrico y volumétrico. El método gravimétrico mide la masa de la muestra, pero presenta mayor complejidad experimental a altas presiones. El método volumétrico es más sencillo de implementar, aunque tiene mayor incertidumbre debido a las conversiones de presión y volumen a masa absorbida [6].

La absorción ocurre cuando el material capta hidrógeno, que puede almacenarse en sus intersticios o sitios cristalinos. El material se expone a hidrógeno en condiciones controladas de presión y temperatura; se quiere llevar el material a una temperatura dada, mientras se inyecta hidrógeno a presión en este. Los átomos de hidrógeno se disocian en la superficie del material y se difunden al interior del mismo. Dependiendo del material, el hidrógeno puede almacenarse físicamente (por adsorción) o químicamente (formando compuestos, como hidruros metálicos). La presión de hidrógeno afecta la cantidad de hidrógeno absorbido, la temperatura influye en la cinética de absorción y la estructura del material; los materiales porosos o con mayor cantidad de vacantes pueden absorber más hidrógeno [5][6].

La desorción es el proceso inverso, en el que el material libera el hidrógeno previamente almacenado. El material se calienta, se reduce la presión externa o se genera un vacío en el sistema, lo que induce la salida del hidrógeno. En los hidruros metálicos, el hidrógeno se separa de los sitios donde estaba almacenado y sale del material. Este proceso es fundamental para el uso práctico del hidrógeno como fuente de energía, donde es necesario liberar el gas almacenado de forma controlada [5][6].

El estudio de estos procesos es crucial en el diseño de materiales de almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones como vehículos de hidrógeno y sistemas de almacenamiento estacionario de energía. Los materiales que exhiben una alta capacidad de absorción de hidrógeno, rápidas cinéticas de absorción/desorción, y una estabilidad cíclica durante varios ciclos de carga y descarga de hidrógeno son de gran interés. Este tipo de caracterización permite mejorar la comprensión y el desarrollo de materiales más eficientes para el almacenamiento de hidrógeno [6].

### 2.1.2 Caracterización por hidrógeno

El proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales se centra en medir con precisión la capacidad de absorción de este gas en materiales bajo alta presión, lo cual es esencial para avanzar en tecnologías de almacenamiento de energía. Los sistemas de caracterización de alta presión, que combinan almacenamiento en fase gaseosa y sólida, han mostrado ser prometedores, proporcionando mayor capacidad y adaptándose a cambios

rápidos de carga. Materiales como las aleaciones TiCrMn y adsorbentes a alta presión se están investigando por su capacidad de almacenamiento de hidrógeno a temperatura ambiente [7].

Es importante considerar en un sistema con hidrógeno, que este es un gas neutro. Cuando se dice que el hidrógeno es un gas neutro, se refiere a que, en su estado molecular ( $H_2$ ), el hidrógeno no tiene carga eléctrica neta, ya que está compuesto por dos átomos de hidrógeno unidos por un enlace covalente [11]. Esto implica que no es un ion ni tiene un exceso de carga positiva o negativa, por lo que no reacciona fácilmente de manera electromagnética con otros iones o moléculas con carga [11]. En muchas aplicaciones, el hidrógeno se considera neutro cuando se utiliza en procesos que requieren gases inertes o neutros para evitar reacciones no deseadas [12].

Además, el hidrógeno es incoloro, inodoro e insípido. Esto significa que no tiene color, olor ni sabor, lo que lo hace difícil de detectar sin instrumentos especializados. A pesar de ser el elemento más abundante en el universo, su falta de olor o color es una de las razones por las cuales es peligroso en aplicaciones industriales. Si se produce una fuga de hidrógeno, no se detecta fácilmente de forma visual o por el olfato, lo que aumenta el riesgo de explosiones en entornos donde pueda mezclarse con el oxígeno y haya una fuente de ignición [13].

El hidrógeno es un gas inflamable y su manejo debe realizarse con estrictas medidas de seguridad. La automatización en el control de válvulas y sensores de presión ayuda a reducir el riesgo de fugas o sobrepresión, asegurando un entorno de trabajo seguro.

### 2.1.3 Material de prueba

El  $LaNi_5$ , un compuesto intermetálico, es decir, una aleación formada por dos metales diferentes, es el material con el que se hacen pruebas en el CIEMTEC. Está compuesto por lantano (La) y níquel (Ni) en una proporción de 1 átomo de lantano por cada 5 átomos de níquel [14].

La característica más destacada del  $LaNi_5$  es su capacidad para absorber y liberar hidrógeno de manera reversible. Esto lo convierte en un material de almacenamiento de hidrógeno muy estudiado y utilizado en diversas aplicaciones. Gracias a su capacidad de almacenar hidrógeno de manera segura y eficiente, el  $LaNi_5$  tiene diversas aplicaciones, entre las que destacan [14]:

- Pilas de combustible: se utiliza como electrodo en pilas de combustible de hidrógeno, donde el hidrógeno almacenado se convierte en electricidad.
- Almacenamiento de energía: puede ser utilizado para almacenar energía en forma de hidrógeno, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable.
- Purificación de hidrógeno: se utiliza para purificar corrientes de hidrógeno, eliminando impurezas como el monóxido de carbono.

Algunas ventajas del  $LaNi_5$  son[15]:

- Alta capacidad de almacenamiento de hidrógeno: Puede almacenar una cantidad significativa de hidrógeno en relación con su propio peso.
- Ciclos de absorción y desorción rápidos y reversibles: Permite una carga y descarga rápida del hidrógeno.
- Seguridad: Es un material relativamente estable y seguro de manejar.

Algunas desventajas del  $LaNi_5$  son[15]:

- Costo: La producción de  $LaNi_5$  puede ser costosa debido al precio de los metales de tierras raras como el lantano.
- Cinética de absorción: A bajas temperaturas, la cinética de absorción de hidrógeno puede ser lenta.
- Degradación: Con el tiempo y los ciclos de carga y descarga, el material puede degradarse y perder su capacidad de almacenamiento de hidrógeno.

El  $LaNi_5$  es un material con un gran potencial para el almacenamiento de hidrógeno y el desarrollo de tecnologías limpias. Sin embargo, aún se requieren más investigaciones para mejorar su rendimiento y reducir sus costos.

## 2.1.4 Automatización de procesos en la industria

La automatización de procesos es un aspecto crucial en la industria moderna, ya que mejora la eficiencia y precisión de las tareas al reducir la intervención humana. Esto es especialmente relevante en procesos que requieren alta precisión, como la caracterización de materiales, donde pequeños cambios en la presión o la temperatura pueden afectar significativamente los resultados. La automatización en estos procesos incluye el uso de sensores, actuadores, y sistemas de control que operan de manera autónoma, lo que asegura consistencia en los resultados, minimización de errores humanos, y monitoreo en tiempo real. La automatización de un proceso como el de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales es de vital importancia para la investigación y mejora de estos [16].

Existen varios tipos de controladores que permiten la automatización, dependiendo del nivel de complejidad y los requerimientos del sistema:

- PLC (Controladores Lógicos Programables): Son dispositivos robustos y confiables, diseñados para entornos industriales donde se manejan entradas y salidas tanto digitales como analógicas. Son usualmente utilizados en procesos que requieren alta resistencia a condiciones adversas, como vibraciones, temperaturas extremas, o ruido eléctrico. Sin embargo, pueden ser costosos y menos flexibles en cuanto a personalización cuando se comparan con soluciones más ligeras [17].

- Microcontroladores: Son más económicos y flexibles que los PLC, altamente empleados en proyectos que no requieren la robustez de un PLC. El ESP32 es un ejemplo que ofrece comunicación Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita la recolección de datos de sensores o el control de actuadores de manera remota. Además, se integra fácilmente con sensores de temperatura, presión, y actuadores, permitiendo un mayor control sobre procesos a nivel más personalizado [18][19].
- Raspberry Pi: Es un microprocesador versátil que puede funcionar como un servidor de control centralizado. Tiene mayor capacidad de procesamiento que los microcontroladores, lo que la convierte en una excelente opción para manejar gráficos en tiempo real e interacción con múltiples dispositivos a través de diversos protocolos de comunicación como RS-485, I2C y SPI [20].

A la hora de seleccionar un controlador adecuado para la automatización, es importante tener en cuenta varios factores clave [21]:

- Capacidad de procesamiento: Para aplicaciones que requieren análisis de datos complejos o visualización en tiempo real.
- Robustez: Si el sistema se encuentra en un entorno industrial, con condiciones adversas (como alta temperatura o vibración).
- Flexibilidad y personalización: Si se necesita un alto grado de personalización en la recolección de datos y control de actuadores.
- Interfaz de comunicación: El protocolo de comunicación que se requiere es crucial para la integración de los dispositivos.

## Equipo PCT del CIEMTEC

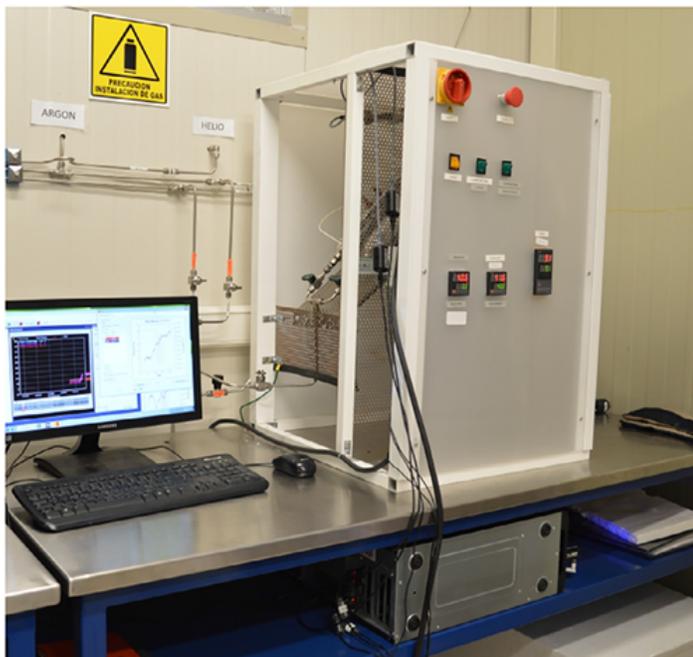
El laboratorio cuenta con un equipo PCT para realizar el proceso. Un equipo PCT (Pressure-Composition-Temperature) es un instrumento utilizado para estudiar la absorción y desorción de gases, como el hidrógeno, en materiales sólidos, representada mediante una curva de caracterización. Este tipo de equipo mide cómo cambia la composición de un material en función de la presión del gas aplicado y la temperatura a la que se realiza el experimento, utilizando la ecuación 2.1 [22][23].

$$\Delta n = \frac{P_i V_i}{RT Z_{i,T}} - \frac{P_f V_f}{RT Z_{f,T}} \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 describe el cambio en cantidad de moles de hidrógeno ( $\Delta n$ ) de acuerdo al cambio de presión.  $P_i$  y  $P_f$  son las presiones inicial y final respectivamente.  $V_i$  y  $V_f$  son los volúmenes inicial ( $V_1+V_2$ ) y final, el cual es usualmente el volumen inicial más el volumen del portador de muestras ( $V_1+V_2+V_3$ ). Esta ecuación también incorpora la constante R, la cual es la constante de los gases ideales, T es la temperatura y finalmente,  $Z_{i,T}$  y  $Z_{f,T}$ ,

representan los factores de compresibilidad para los estados inicial y final. Este cálculo es fundamental para evaluar el desempeño del material en condiciones simuladas de operación [23].

Este equipo ha sido creado basándose en dos informes sobre el aparato de Sievert [5][6] presente en la Figura 2.1. El equipo presente en el laboratorio se presenta en la Figura 2.2[5].

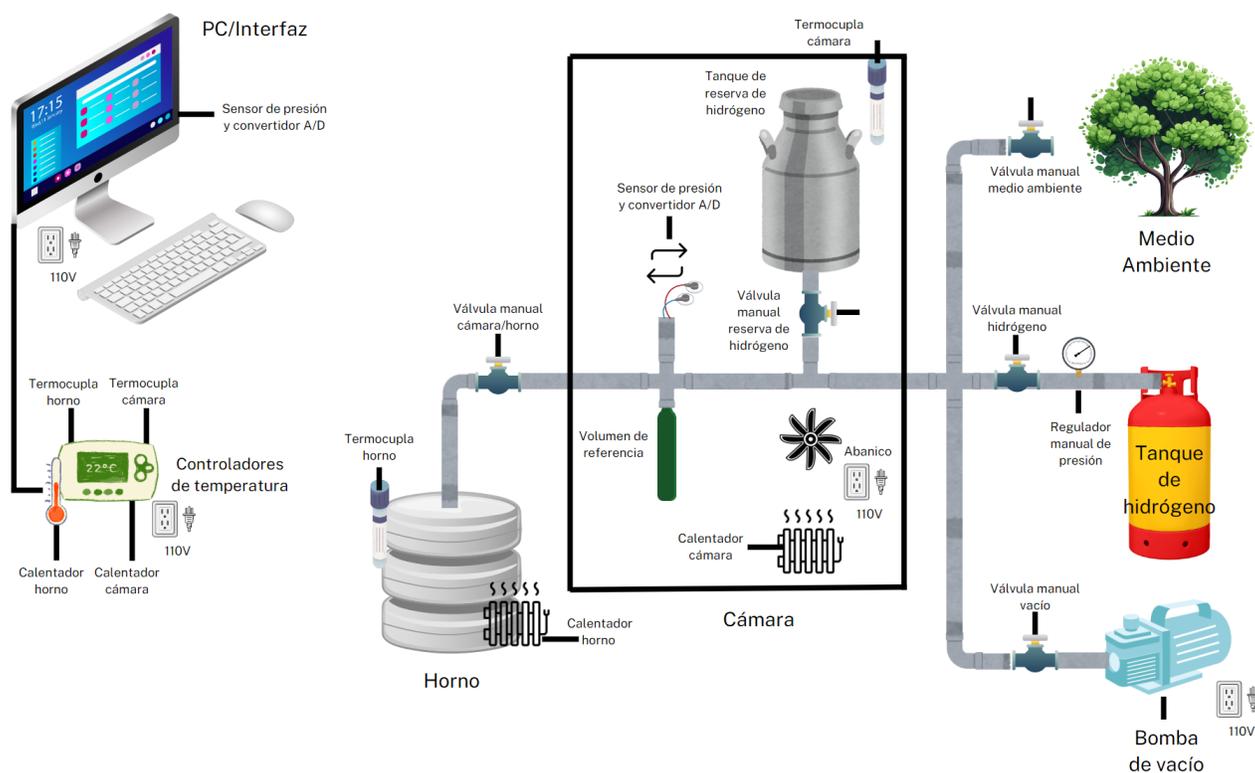


**Figura 2.1:** Aparato de tipo Sieverts de bajo coste para el estudio de reacciones de hidratación/deshidratación construido en la UNAM, México.



**Figura 2.2:** Equipo PCT presente en el laboratorio.

En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de dicho sistema ubicado en el CIEMTEC.



**Figura 2.3:** Diagrama del sistema de absorción volumétrica de hidrógeno actual ubicado en el CIEMTEC.

### 2.1.5 Dispositivos en el mercado

En el mercado actual, existen diversos equipos especializados diseñados para evaluar las propiedades de absorción y desorción de hidrógeno en sólidos. Estos dispositivos ofrecen una amplia gama de funcionalidades y niveles de precisión, adaptándose a las necesidades específicas de cada investigación.

#### Sistemas PCT (Presión-Composición-Temperatura)

Los sistemas PCT, como el GASPRO Setaram y el IMI-HTP de Hiden Isochema, son herramientas de alta precisión utilizadas para caracterizar materiales de almacenamiento de hidrógeno. Como se mencionó anteriormente, estos equipos permiten medir con gran detalle la cantidad de hidrógeno absorbido o desorbido por un material en función de la presión y la temperatura, utilizando el método Sieverts. Al variar estas condiciones, es posible determinar la capacidad de almacenamiento, la cinética de absorción/desorción y la termodinámica del proceso. Estos equipos permiten establecer condiciones de operación muy específicas para simular diferentes escenarios, pueden operar a altas presiones y temperaturas, lo que es esencial para evaluar el comportamiento de los materiales en condiciones reales de aplicación.

e incluyen software para el control del equipo, adquisición de datos y análisis de resultados. Su precio se estima en un rango de \$100,000 a \$150,000 USD, dependiendo de las especificaciones y las opciones adicionales. En las Figuras 2.4 y 2.5 se observan los equipos [24][25].



**Figura 2.4:** GASPRO Setaram.



**Figura 2.5:** IMI-HTP.

### Calorímetros de Hidruros

Los calorímetros especializados, como el Espectrómetro de masa QGA ofrecido por Hidden Analytical, complementan la información proporcionada por los sistemas PCT. Estos equipos miden la cantidad de calor liberado o absorbido durante los procesos de absorción y desorción de hidrógeno. Esta información es crucial para evaluar la termodinámica de los materiales y optimizar su desempeño [26].

Características clave de los calorímetros de hidruros [26]:

- Alta precisión en la medición de flujo de gas y control de presión.
- Capacidad de análisis de múltiples muestras simultáneamente.

- Integración con controladores de temperatura y presión.
- Miden la cantidad de hidrógeno absorbido o desorbido por un material en función del tiempo, temperatura y presión. Estos sistemas permiten analizar la termodinámica y la cinética de formación de hidruros.
- Diseñado para análisis cuantitativo de gases y tiene un costo aproximado de \$50,000 a \$70,000, dependiendo de las opciones adicionales, como la integración con software especializado y mejoras de hardware.

En la Figura 2.6 se observa el calorímetro mencionado [26].



**Figura 2.6:** Espectrómetro de masa QGA.

### Sistemas de Vacío y Análisis de Gases Residuales

Los sistemas de vacío y los analizadores de gases residuales, como el Pfeiffer Vacuum Capilar de Pfeiffer Vacuum y el FTIR MKS Instruments, son herramientas para la caracterización de materiales de almacenamiento de hidrógeno. Estos equipos permiten analizar la pureza del hidrógeno utilizado, detectar la presencia de impurezas y evaluar la estabilidad de los materiales en condiciones de vacío [27][28].

Estos equipos permiten analizar la pureza de los gases y la cantidad de hidrógeno desorbido por los materiales, ayudando a caracterizar su comportamiento en condiciones específicas de vacío y presión. Utilizan sensores de alta precisión para la detección de gases y software integrado para la adquisición y procesamiento de datos. Además, pueden analizar una amplia variedad de gases y permiten identificar y cuantificar los diferentes componentes de una mezcla gaseosa [27][28]. El Pfeiffer Vacuum RGA puede costar alrededor de \$25,000 a \$50,000, dependiendo de los sensores y configuraciones específicas [27]. El FTIR de MKS Instruments está en un rango de \$30,000 a \$80,000, dependiendo del modelo y la precisión del análisis [28].

En las Figuras 2.7 y 2.8 se observan los sistemas mencionados [27][28].



Figura 2.7: Pfeiffer Vacuum Capilar.



Figura 2.8: FTIR.

## 2.2 Sistema de válvulas

El uso de válvulas en sistemas automatizados es fundamental para controlar el flujo de gases y líquidos de manera precisa y segura. Estos sistemas permiten la apertura y cierre de válvulas de manera programada y precisa, lo cual es esencial para evitar errores humanos y asegurar la repetibilidad en los procesos [29].

En un sistema industrial, diferentes tipos de válvulas juegan un rol crucial para gestionar el flujo de fluidos. Las electroválvulas son válvulas controladas eléctricamente que permiten o impiden el paso de un fluido al accionar un solenoide. Son comúnmente utilizadas en aplicaciones donde se requiere un control rápido y preciso del flujo de gases o líquidos. Funcionan cuando una corriente eléctrica energiza el solenoide, creando un campo magnético que abre o cierra la válvula [29]. Son controladas mediante señales eléctricas que provienen de un microcontrolador, microprocesador o PLC.

Las válvulas neumáticas son operadas por aire comprimido. Estas fueron pensadas para sistemas donde se maneja presión de aire o gases, y suelen ser usadas en aplicaciones industriales que requieren seguridad en su operación. Cuando el aire comprimido se dirige al

actuador de la válvula, esta abre o cierra, permitiendo o bloqueando el paso del fluido [30]. Estas controlan el flujo de hidrógeno o vacío, y son accionadas normalmente mediante un actuador, como un manifold, que distribuye el aire comprimido de manera controlada.

Un manifold es un conjunto de válvulas conectadas que permite distribuir gases o aire comprimido a diferentes partes del sistema de manera controlada. En el sistema, el manifold actúa como un nodo central desde donde se distribuye aire comprimido hacia las válvulas neumáticas [31]. Al automatizar el control del manifold, se puede gestionar eficientemente el flujo de gases dentro del sistema. Esto no solo mejora la precisión, sino que también reduce el riesgo de errores en el control manual de las válvulas, aumentando la seguridad, especialmente cuando se maneja un gas inflamable como el hidrógeno.

Para controlar las válvulas neumáticas conectadas al manifold, se utilizan relés. Los relés actúan como interruptores que permiten que una señal de bajo voltaje, proveniente del controlador, active un circuito de mayor voltaje necesario para accionar las válvulas.

Las válvulas están conectadas a un sistema de control que puede ajustar la apertura o cierre en función de los valores de presión o tiempo establecidos en la programación del proceso. Esto es especialmente útil para realizar procesos como la purga de hidrógeno, la prueba de presión, o la caracterización de materiales.

## 2.3 Control de Presión y Temperatura

### 2.3.1 Presión

El control preciso de la presión es crucial en cualquier sistema que maneje gases, particularmente en aplicaciones como la absorción de hidrógeno en materiales. La presión debe mantenerse dentro de rangos específicos para asegurar la estabilidad del proceso y evitar fluctuaciones bruscas que puedan alterar el comportamiento del material. En la caracterización de materiales para almacenamiento de hidrógeno, un control inapropiado de la presión puede comprometer la capacidad de absorción o desorción, afectando la validez de los resultados experimentales [6].

Como se mencionó en la sección 2.1.4, durante la caracterización de hidruros metálicos o adsorbentes, las variaciones en la presión afectan la cantidad de hidrógeno que el material puede almacenar. Un cambio repentino en la presión podría alterar la cinética de absorción/desorción, generando resultados inconsistentes [5]. Por ello, es esencial contar con un sistema que pueda regular la presión de manera precisa y estable, especialmente durante ciclos largos de experimentación.

Los reguladores de presión son dispositivos clave en sistemas que trabajan con gases. Estos reguladores ajustan la presión de entrada de acuerdo con un valor objetivo, asegurando que el gas fluya de manera controlada hacia la cámara de ensayo. Existen reguladores analógicos y digitales, siendo los digitales preferidos en sistemas automatizados por su precisión y facilidad de integración con controladores programables. El control de presión se basa en

la retroalimentación proporcionada por los sensores de presión y la comunicación con el sensor, mediante el protocolo RS-485, por ejemplo, la cual garantiza la transmisión robusta y eficiente de datos [32]. Más adelante se comparan algunos protocolos utilizados en procesos.

### 2.3.2 Temperatura

El control de la temperatura es tan crucial como el control de la presión en la caracterización de materiales. Como se mencionó en la sección 2.1.4, la temperatura afecta directamente la velocidad a la que los materiales absorben y liberan hidrógeno, lo que implica que un mal control de esta variable podría alterar los resultados. En sistemas automatizados, se utilizan controladores de temperatura digitales, que se basan en la lectura de sensores como las termocuplas o sensores RTD para ajustar los actuadores que calientan o enfrían el sistema [33].

En la absorción de hidrógeno, la temperatura influye directamente en la cinética de la reacción, permitiendo que el gas interactúe con el material. La estabilidad de la temperatura en el horno donde se coloca el material es crítica para asegurar que los datos recogidos sean consistentes. Un control preciso evita la degradación del material y maximiza su capacidad de almacenamiento [6].

Para mantener la temperatura estable, el sistema utiliza calentadores conectados a los controladores de temperatura, que generan el calor necesario dentro del horno. Además, un abanico distribuye el calor uniformemente en la cámara, asegurando que no existan zonas de sobrecalentamiento o enfriamiento que puedan afectar la integridad del proceso.

### 2.3.3 Control PID

Los reguladores de presión y controladores de temperatura suelen implementar un control PID. El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es ampliamente utilizado en sistemas que requieren un control preciso de variables como la presión y la temperatura. Este algoritmo ajusta la salida de un sistema en función de la diferencia entre el valor real (medido por sensores) y el valor deseado (setpoint). El control proporcional responde de forma directa a la magnitud del error, el integral busca eliminar errores acumulados a lo largo del tiempo, y el derivativo prevé cambios futuros, ayudando a reducir la oscilación y el sobreimpulso [34].

El PID permite una regulación estable y ajustada. Por ejemplo, en un sistema de absorción de hidrógeno, el PID puede ajustar continuamente la presión dentro de la cámara o la temperatura en el horno, garantizando que los parámetros se mantengan dentro de los rangos para la caracterización de materiales sin variaciones bruscas o inconsistencias.

Además, los controladores PID son comunes en aplicaciones industriales debido a su capacidad de adaptarse a sistemas donde la carga cambia con frecuencia o donde es crucial mantener una estabilidad constante en la variable controlada. Esto es esencial en experimentos que requieren mantener condiciones estables para obtener resultados reproducibles

y confiables [34].

El controlador PID se puede implementar en código de programación para sistemas embebidos o computadoras, lo que permite el control de variables físicas, como presión y temperatura, sin depender de un dispositivo regulador digital específico. La implementación en código se basa en la lógica del algoritmo PID, que utiliza las lecturas de sensores para ajustar la salida del sistema.

El algoritmo PID puede ser descrito por la ecuación 2.2 [35]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Donde:

- $u(t)$  es la señal de control enviada al actuador (por ejemplo, un calentador o una válvula).
- $e(t)$  es el error en el tiempo  $t$ , definido como la diferencia entre el setpoint y la medición actual.
- $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son las ganancias del controlador proporcional, integral y derivativo, respectivamente.
- $e(t)$  es el valor del error.
- $de(t)$  es el cambio en el valor del error
- $dt$  es el cambio en el tiempo

La implementación de un controlador PID en código permite un alto grado de personalización y flexibilidad. Los ingenieros pueden ajustar las ganancias del PID para optimizar el rendimiento del sistema de acuerdo con las condiciones específicas del proceso. Esta implementación es especialmente útil en entornos donde no se requiere la robustez de un regulador digital, pero donde se necesita un control preciso y eficaz [35].

Esto permite un control detallado de sistemas de absorción de hidrógeno y otras aplicaciones donde las condiciones deben mantenerse constantes para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados experimentales [34][35].

El uso de controladores PID para regular la presión puede presentar ciertos retos en su diseño ingenieril. Uno de estos retos es la complejidad, ya que podría ser necesario enfrentar sistemas complicados y no lineales, como el flujo turbulento, la compresibilidad o la cavitación. Otro desafío es el ajuste del controlador, que puede requerir tiempo y esfuerzo para determinar las ganancias óptimas del PID, las cuales pueden cambiar dependiendo de las condiciones del sistema. Finalmente, las interferencias también pueden ser un problema, especialmente cuando es necesario considerar las interacciones y acoplamientos entre varios controladores PID en un mismo sistema, lo que podría generar inestabilidad u oscilaciones, y requerir estrategias de coordinación o desacoplamiento para resolverlo [36].

Sin embargo, si se quiere implementar un PID, se debe tomar en cuenta que los actuadores deben ser compatibles con este tipo de control. En un sistema de válvulas ON-OFF, el control continuo del PID no es aplicable de forma directa, ya que las válvulas solo pueden estar completamente abiertas o cerradas, sin posiciones intermedias. Aquí es donde se introduce el control por histéresis.

### 2.3.4 Control ON/OFF con histéresis

El control ON-OFF con histéresis incorpora un retardo en el cambio de la señal para disminuir la cantidad de conmutaciones, prolongando la vida útil de los componentes [37].

La histéresis está definida como la diferencia entre los tiempos de apagado y encendido del controlador [38]. Esta lógica evita que el controlador esté encendiendo y apagando el actuador (como una válvula) de manera excesivamente rápida cuando las condiciones están cerca del punto de activación. La histéresis introduce un rango de tolerancia, o banda muerta, que evita que el sistema reaccione de inmediato a pequeñas fluctuaciones alrededor del "setpoint" [37].

Por ejemplo, si se controla la presión en un sistema con una válvula ON/OFF, la histéresis evitará que la válvula se abra y cierre constantemente cuando la presión esté fluctuando cerca del valor objetivo. Esto aumenta la estabilidad y evita un desgaste innecesario del equipo. Sin embargo, aumentar la zona muerta provocará menor precisión en torno a la referencia [37].

## 2.4 Comunicación entre dispositivos

En un sistema automatizado de adquisición de datos y control, la comunicación entre dispositivos es esencial para garantizar una correcta transferencia de datos y señales de control. Esto involucra tanto la conexión entre la PC que gestiona la interfaz de usuario como los controladores de temperatura y presión, así como los actuadores y sensores que participan en el proceso de caracterización.

### 2.4.1 Comunicación PC-Controladores

Para establecer la comunicación entre la PC y los controladores, es necesario utilizar protocolos de comunicación estándar que permiten la transferencia de datos y señales de control en tiempo real. Los protocolos que se utilizan dependen de la complejidad del sistema y de los dispositivos involucrados. Los más comunes en la industria son RS-485, RS-232 e I2C, cada uno con sus características específicas.

- I2C (Inter-Integrated Circuit) [39]:

- Es un protocolo de comunicación en serie que permite que múltiples dispositivos (sensores, controladores, etc.) se comuniquen con un solo microcontrolador o procesador.
  - Ventajas: I2C utiliza solo dos cables (uno para datos y otro para el reloj), lo que simplifica el diseño del sistema. Permite la comunicación entre varios dispositivos esclavos y un maestro en un mismo bus.
  - Desventajas: El I2C tiene una velocidad de transferencia limitada, lo que puede no ser suficiente para aplicaciones que requieren un gran volumen de datos en tiempo real o que manejan distancias largas.
- RS-485 [40][41]:
    - Es un protocolo de comunicación en serie que permite la transmisión de datos a través de largas distancias y es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Utiliza líneas de señal diferencial para minimizar la interferencia y el ruido.
    - Ventajas: Su capacidad para transmitir datos a largas distancias (hasta 1200 metros) y la posibilidad de conectar múltiples dispositivos en un mismo bus lo hace la mejor opción para sistemas industriales. También permite la comunicación bidireccional.
    - Desventajas: RS-485 es más complejo de implementar que I2C o RS-232 debido a la necesidad de una configuración de cableado más específica y un mayor número de dispositivos involucrados.
  - RS-232 [42][41]:
    - Es uno de los primeros protocolos de comunicación en serie, que permite la transferencia de datos entre dos dispositivos. Es más adecuado para conexiones punto a punto distancias cortas (hasta 15 metros).
    - Ventajas: Es muy sencillo de implementar y se utiliza ampliamente en sistemas donde la velocidad y la distancia no son un problema. Es útil para la comunicación entre la PC y un único dispositivo.
    - Desventajas: Comparado con RS-485, RS-232 es más lento y no permite conectar múltiples dispositivos en un solo bus.

En la Tabla 2.1 se observa una comparación más clara entre los protocolos de comunicación [39][41][42][40].

**Tabla 2.1:** Comparación de protocolos de comunicación.

Protocolo	Tipo	Velocidad Máxima	Distancia	Número de Dispositivos	Costo	Robustez	Uso en Proyecto
I2C	Serial	100 kbit/s (estándar), hasta 3.4 Mbit/s (alta velocidad)	Hasta 1 metro	Hasta 127 dispositivos	Bajo	Moderada	Apropiado para comunicación entre sensores y microcontroladores en sistemas pequeños.
RS-232	Serial	Hasta 115.2 kbit/s	Hasta 15 metros	2 (punto a punto)	Bajo a medio	Baja	Adecuado para conexiones simples entre dos dispositivos, como PC y un solo dispositivo.
RS-485	Serial	Hasta 10 Mbit/s	Hasta 1200 metros	Hasta 32 dispositivos (puede ser ampliado)	Medio	Alta	Apto para entornos industriales y aplicaciones que requieren largas distancias y múltiples dispositivos.

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología es un componente esencial en el desarrollo de cualquier proyecto, ya que proporciona un marco estructurado para abordar los desafíos y garantizar la alineación con los objetivos establecidos. En este capítulo, se presentará la metodología empleada para el desarrollo del sistema de automatización de caracterización de materiales.

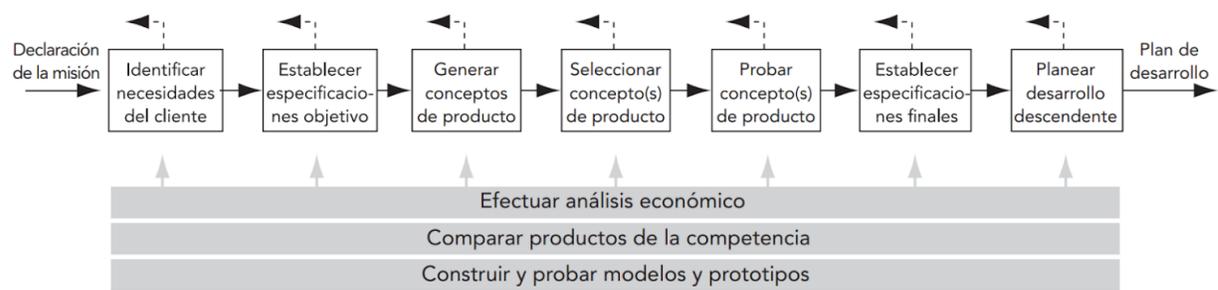
En las secciones siguientes, se describirán detalladamente los pasos de la metodología, los métodos de recolección de datos, la identificación de necesidades, la generación de métricas y valores objetivo, la generación de conceptos, así como la selección del concepto final. Este enfoque permite ofrecer una visión comprensiva del proceso seguido y asegura la transparencia en las decisiones tomadas a lo largo del desarrollo del proyecto.

### 3.1 Pasos de la metodología

La metodología utilizada en el desarrollo de este proyecto es la propuesta por Ulrich en su libro "Diseño y desarrollo de productos"[43]. Esta metodología divide el proceso en distintas fases, las cuales se ejecutan en forma secuencial, como se muestra en la Fig. 3.1[43]. Cabe destacar que este proceso es iterativo, por lo que en cualquier momento que se identifique una deficiencia en alguna de las etapas se volverá a esta etapa para aplicar las mejoras o correcciones correspondientes. Este capítulo comprenderá el proceso, desde la identificación de necesidades hasta la selección del concepto ganador.

Las etapas por abordar son las siguientes [43]:

- Identificar las necesidades del cliente: Corresponde a la primera etapa de la metodología. Consiste en identificar todos los requisitos que debe cumplir la solución. Esto se realiza a partir de diversas comunicaciones con el cliente donde se identifica y procesa cada deseo en forma de necesidad para evitar sesgos. Adicionalmente, se le asigna a cada necesidad una importancia, definida por el cliente, la cual es utilizada en fases posteriores como razón de peso para la toma de decisiones.
- Establecer especificaciones objetivo: Los valores objetivo o métricas son traducciones



**Figura 3.1:** Fases de la metodología para el desarrollo del concepto.

de las necesidades previamente definidas a valores técnicos y representan las expectativas del equipo de desarrollo. Cada métrica se asocia con al menos una necesidad y permiten determinar el grado de cumplimiento de la necesidad por parte la solución.

- **Generar conceptos del producto:** Es una de las etapas clave, ya que es donde se proponen todas las posibles soluciones que se pueden utilizar. Se inicia con una división funcional donde se identifican todas las posibles subfunciones de la solución para posteriormente proponer soluciones o conceptos para cada una de las funciones. La generación de conceptos se realiza a través de una búsqueda interna y externa para asegurar la cobertura de un rango amplio de opciones.
- **Seleccionar concepto del producto:** Corresponde a la última etapa que se va a desarrollar durante este capítulo. Se realizan combinaciones de conceptos utilizando las soluciones previamente generadas, cada posible solución se compara mediante un sistema de selección de matriz, donde se realiza primero una etapa de filtrado y se dejan únicamente las combinaciones de mayor interés para luego concluir con una etapa de evaluación donde se determina el concepto o los conceptos ganadores. Para cada matriz se debe seleccionar una referencia que es utilizada como base para la comparación y establecen criterios con base en las necesidades previamente identificadas.

## 3.2 Identificación de necesidades

Primeramente, se recolectaron datos del cliente, utilizando diferentes métodos como entrevistas, correos electrónicos, documentos internos y diversas conversaciones. Todas las necesidades fueron planteadas conociendo las limitaciones mencionadas anteriormente. De cada uno de estos intercambios se extrajeron todas las frases o comentarios que se pudieran identificar como una necesidad y se procesaron siguiendo las siguientes reglas [44]:

- Se expresa la necesidad en términos de lo que el producto tiene que hacer, no como tiene que hacerlo.
- Se expresa la información tan específica como la información recompilada, sin realizar afirmaciones de detalles no presentes en la declaración original.

- Utilizar enunciados de forma positiva.
- Se expresa la necesidad como un atributo del producto.
- Se evitan las palabras debe y debería.

Una vez que todas las necesidades son identificadas y procesadas, se les debe asignar un nivel de importancia relativa a cada una. Este nivel de importancia ayuda a establecer el nivel de prioridad que tiene cada necesidad respecto al resto, además, funciona como una capa de comprobación adicional para asegurarse de que se le entendió correctamente al cliente. Esta información es de suma importancia para la toma de decisiones en etapas posteriores. El sistema de importancia consiste en asignar un valor numérico entre uno y cinco a cada necesidad, donde cada valor tiene su propio significado [44], como se muestra en Tabla 3.1.

Los niveles de importancia entre tres y cinco se consideran funciones deseables, siendo cinco el único que se considera imprescindible. Importancia uno, en cambio, es una función que se considera indeseable y dos se considera indiferente. Se pasó el formulario que se muestra en las figuras del apéndice A, al cliente, donde se le entregó una lista con los significados de cada nivel de importancia, un cuadro con todas las necesidades y un espacio para llenar la importancia asociada.

Cabe mencionar que en este punto se recibió retroalimentación adicional del cliente, la cual ayudó a identificar con mayor precisión sus necesidades reales.

**Tabla 3.1:** Nivel de importancia con su respectivo significado.

Importancia	Significado
1	La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2	La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3	Sería bueno tener esta función, pero no es necesario.
4	La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5	La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

Todas las necesidades identificadas se pueden observar en la Tabla 3.2, cada una con su respectiva importancia. Además, se identifica que existen nueve necesidades de importancia crítica.

**Tabla 3.2:** Nivel de importancia con su respectivo significado.

Num	Necesidad	Importancia
1	La SD minimiza desperdicios de hidrógeno por errores humanos.	5
2	La SD permite retirar la muestra del sistema sin perder la presión en la cámara.	4
3	La SD controla un rango de presión de 0 kPa a 4000 kPa.	5
4	La SD ejecuta un proceso de limpieza del sistema.	4
5	La SD realiza un proceso de prueba de pérdidas de presión.	4
6	El uso de la SD es amigable con el usuario.	3
7	La SD notifica al usuario eventos de interés como errores en el proceso o finalización de este.	3
8	La SD cuenta con una interfaz donde se visualizan gráficas de temperatura y presión en tiempo real.	5
9	La SD registra y almacena datos de temperatura, presión y tiempo, en un formato compatible con herramientas de graficación.	5
10	La SD obtiene datos de las variables críticas mediante un proceso de caracterización definido por variación de presiones y temperatura.	5
11	La SD permite la extracción de los datos obtenidos.	4
12	El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio.	4
13	La SD controla un rango de temperatura de 25 °C a 400 °C en el horno.	5
14	La SD mantiene la temperatura de la cámara constante.	5
15	La SD mide presión con una precisión mínima $\pm 0.1$ kPa.	5
16	La SD mide la temperatura con una precisión mínima de $\pm 0.1$ °C.	5
17	La SD utiliza piezas estándar.	3
18	La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado.	5
19	La SD reduce el tiempo necesario para ejecutar el proceso.	4

Se observa que todas las necesidades fueron puntuadas con un número mayor o igual a tres, lo cual es positivo, ya que demuestra que se identificaron las necesidades del cliente adecuadamente.

### 3.2.1 Reflexión

Durante la etapa de reflexión de las necesidades del proyecto, se realizaron ajustes importantes en función de las prioridades y viabilidad técnica identificadas. En primer lugar, se eliminaron dos necesidades clave. La primera, "La SD permite el monitoreo remoto fuera de la institución", fue descartada debido a que requería permisos específicos y duraderos para recibir información externa al TEC. Esto habría impactado significativamente en el tiempo de ejecución del proyecto, lo que llevó al asesor industrial a concluir que el monitoreo remoto no era una prioridad y podía omitirse.

Asimismo, la necesidad "La SD ejecuta un proceso respectivo automáticamente luego de que el usuario lo indique" se eliminó, ya que esta funcionalidad estaba implícita en otras

tres necesidades previamente definidas, las cuales cubren los procesos automáticos, evitando redundancias.

En cuanto a otras necesidades, se discutieron ajustes en colaboración con el asesor industrial tras los resultados de la encuesta. La necesidad "La SD permite conectarse con dispositivos externos" fue redefinida como "La SD permite la extracción de los datos obtenidos", lo que incrementó su prioridad, reflejada en un cambio de puntuación de 1 a 4. De manera similar, "La SD es elaborada con los recursos de la institución" fue reformulada como "La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado", lo que aumentó su puntuación de 2 a 5.

Finalmente, aunque la seguridad no fue considerada inicialmente como una necesidad explícita por el cliente, se destacó su importancia en el diseño del sistema, ya que es un aspecto que debe integrarse de manera implícita en el desarrollo, para garantizar la integridad y el funcionamiento seguro del sistema a largo plazo.

### 3.3 Generación de métricas y establecimiento de valores objetivo

Las métricas se elaboran a partir de las necesidades previamente identificadas y deben ser cuantificables, ya que su función es evaluar el grado de cumplimiento de la solución, evitando descripciones subjetivas. Es fundamental que cada necesidad esté vinculada a al menos una métrica, ya que, de no ser así, no se podrá garantizar que se satisfacen los requerimientos del cliente.

Para cada métrica, se establece un valor ideal, que representa la meta deseada, y un valor marginal, que se refiere a límites más permisivos que definen lo que se considera aceptable en la solución final. La flexibilidad de estos rangos se determina según la importancia de cada necesidad: aquellas que son más críticas requieren valores más estrictos, mientras que las de menor relevancia pueden tener criterios de aprobación más flexibles. Se emplearon tres tipos principales de criterios: magnitudes, binarios, listas y subjetivo. Las magnitudes son valores cuantitativos que miden propiedades físicas; los binarios indican si se cumple o no la métrica; las listas verifican si se han cumplido las opciones de las listas correspondientes; y las subjetivas son las que se deben evaluar de alguna forma distinta, ya que son dependientes del uso de los usuarios del sistema.

Todas las métricas generadas se pueden consultar en la Tabla 3.3. Además, se utilizó una matriz de necesidades-métricas para confirmar que cada necesidad estuviera representada por al menos una métrica. Esta matriz se muestra en la Tabla 3.4. Es importante señalar que, para algunas necesidades, se desarrollaron múltiples métricas, ya que estaban relacionadas con más de un parámetro o propiedad que debían cumplirse.

**Tabla 3.3:** Especificaciones establecidas.

Ítem	Necesidad	Métrica
M1	1, 2, 3, 4, 5.	Presión en el sistema
M2	4, 5	Tiempo de respuesta de las válvulas
M3	5	Variabilidad de los datos recolectados
M4	6	Facilidad de uso de la interfaz
M5	6	Tiempo de capacitación
M6	6, 7	Sistemas de notificación al usuario
M7	8	Interfaz muestra datos en vivo
M8	9	Formatos de exportación
M9	9.	Cantidad de memoria de almacenamiento
M10	9.	Tipo de memoria
M11	9, 10	Variables registradas
M12	11	Conectividad
M13	12	Tipo de alimentación
M14	13	Temperatura en el horno
M15	3, 13, 14	Tipo de controlador
M16	14	Temperatura en la cámara
M17	15, 16	Precisión del sensor
M18	17	Cantidad de piezas únicas
M19	18	Costo de manufactura
M20	19	Tiempo de puesta en marcha del proceso

**Tabla 3.4:** Correspondencia de necesidades con las especificaciones de la tabla 3.2

Item	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
N1	x																			
N2	x																			
N3	x														x					
N4	x	x																		
N5	x	x	x																	
N6				x	x	x														
N7						x														
N8							x													
N9								x	x	x	x									
N10											x									
N11												x								
N12													x							
N13														x	x					
N14															x	x				
N15																	x			
N16																	x			
N17																		x		
N18																			x	
N19																				x

La selección de los valores marginales e ideales fue realizada con base tanto en los deseos del cliente como fuentes externas. Los deseos del cliente se utilizaron cuando las métricas se referían a funciones específicas expresadas explícitamente por el cliente, como el cumplimien-

to de las métricas binarias y las listas de funciones. Para el resto se utilizaron referencias externas en combinación con los deseos del cliente para definir rangos marginales e ideales para cada una.

Las métricas de presión en el sistema y temperatura en cámara y horno (M1, M14 y M16), están definidas meramente por el cliente, tanto su valor ideal como marginal. Estas dos variables físicas son críticas en la ejecución del proceso y se quieren controlar en los rangos de 1000 kPa - 4000 kPa para la presión, 35 °C constantes en la cámara y 20 °C - 400 °C en el horno.

El valor marginal del tiempo de respuesta de las válvulas (M2) está definido en 0.5 segundos y el valor ideal en 2 segundos definidos por el cliente, tomando en consideración que este tiempo toma en cuenta la respuesta de la electroválvula del manifold y la válvula neumática. El tiempo de respuesta de la electroválvula se puede medir mediante la medición de la señal enviada desde la interfaz de control, ya que la respuesta de estas suelen ser muy rápidas. Por otra parte, el tiempo de respuesta de la válvula neumática se puede medir mediante el uso de un sensor de flujo disponible en el laboratorio. La suma de ambas respuestas es el tiempo de respuesta de las válvulas. Se considera que obtener tiempos de respuesta inferiores requiere en inversión de electroválvulas individuales, lo cual es más caro que la obtención del manifold y las válvulas neumáticas [45].

La variabilidad de los datos recolectados (M3) cuenta con valores objetivo definidos por cliente, de tal forma que se relaciona con las métricas de precisión del sensor (M17), variables registradas (M11) e interfaz muestra datos en vivo (M7). Estas métricas son críticas debido a la naturaleza del proceso que se quiere automatizar.

El tiempo de capacitación (M5) máximo que debe recibir una persona al día son 8 horas, por lo que definió ese como el valor marginal y 4 horas como valor marginal luego de discusiones con el cliente [46].

Los sistemas de notificación al usuario (M6) están definidos por una lista, entre los cuales se definen mensajes o señales en la interfaz gráfica, sonidos e indicadores visuales como luces externas. Esta métrica tuvo modificaciones, tal como se comenta en la reflexión de la presente sección más adelante.

En cuanto a los formatos de exportación (M8), el cliente requiere que el formato tenga compatibilidad con herramientas de graficación como Excel, por lo que tiene una importancia crítica. Se definió una lista de posibles formatos de extracción de los datos. Respecto a la cantidad y tipo de memoria de almacenamiento (M9 y M10), los valores se definieron con base en los recursos del laboratorio y peticiones del cliente. En el centro de investigación existe una computadora con características suficientes para soportar la automatización del sistema, sin embargo, se explorarán más opciones como se observa en la sección 3.4. Por otra parte, la conectividad (M12) se refiere a la capacidad del sistema para conectarse y extraer los datos de este, por lo que se define una lista de tipos de conexión para extracción de datos [47].

El tipo de alimentación (M13) del sistema tiene que ver con la capacidad de adaptación a la

fuelle de energía proveniente del laboratorio, por lo que se provee una lista definida por el cliente.

Para el tipo de controlador (M15) se deben considerar las opciones ofrecidas tanto por el cliente como las existentes en el mercado, considerando siempre la utilización de los recursos del laboratorio, por lo tanto, se crea una lista con opciones tanto comerciales como disponibles en el centro de investigación.

La cantidad de piezas únicas (18) está definida por el cliente: estas tienen que ver con la cantidad de piezas no estándar que se deben diseñar e implementar en el sistema.

El costo de manufactura (M19) del proyecto está relacionada con todas las métricas definidas, tomando en consideración que una necesidad crítica del cliente es abarcar el proyecto utilizando la mayor cantidad de recursos disponibles, lo que quiere decir, comprando lo menos posible. Este valor de presupuesto es dado por el cliente.

El tiempo en marcha del sistema (M20) tiene que ver con lo que dura el usuario en ejecutar el limpiado inicial del sistema y poner en marcha el proceso de caracterización del sistema. Estos procesos son detallados más adelante en el capítulo 4.

Por último, existe una métrica subjetiva (M4), la cual se piensa evaluar mediante una encuesta a los usuarios del sistema. Esta tiene que ver con el cómo se siente el usuario utilizando el sistema. Dicha encuesta se encuentra en el apéndice I.

En la Tabla 3.5 se muestran para cada métrica su importancia, unidades, valores objetivo y valores marginales, correspondiente a cada necesidad.

**Tabla 3.5:** Valores objetivo establecidos.

# Métrica	# Necesidad	Métrica	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1, 2, 3, 4, 5	Presión en el sistema	5	kPa	<3000	<5000
2	4, 5	Tiempo de respuesta de las válvulas	4	Segundos	<2	<0.5
3	5	Variabilidad de los datos recolectados	5	%	<10	<1
4	6	Facilidad de uso de la interfaz	3	Subj.	>3	5
5	6	Tiempo de capacitación	3	horas	<8	<4
6	6, 7	Sistemas de notificación al usuario.	3	Lista	Mensaje en interfaz	Mensaje en interfaz Por sonido Indicadores visuales (luces) Email
7	8	Interfaz muestra datos en vivo.	5	Binaria	Si	Si
8	9	Formatos de exportación.	5	Lista	.csv	.csv .xlsx .json
9	9	Cantidad de memoria de almacenamiento.	5	GB	>8	>32
10	9	Tipo de memoria	5	Lista	HDD	HDD SSD Memoria Flash
11	9, 10	Variables registradas	5	Lista	Tiempo Presión Temperatura	Tiempo Presión Temperatura Pérdidas de presión
12	11	Conectividad	4	Lista	Inalámbrica USB SATA	Inalámbrica USB SATA
13	12	Tipo de alimentación	4	Lista	Adaptador de corriente	Batería recargable Adaptador de corriente UPS
14	13	Temperatura en el horno	5	°C	<400	<600
15	3, 13, 14	Tipo de controlador	5	Lista	Micro PLC PID Proporcional Regulador	Micro PLC PID Proporcional Regulador
16	14	Temperatura en la cámara	5	°C	35	35
17	15, 16	Precisión del sensor	5	°C/ kPa	>±0.1	>±0.01
18	17	Cantidad de piezas únicas.	3	Unidades	<10	<5
19	18	Costo de manufactura	5	C	<100000	<50000
20	19	Tiempo de puesta en marcha del sistema.	4	Segundos	<198	<139

### 3.3.1 Reflexión

La métrica relacionada con el estado de las válvulas ha sido eliminada, ya que su propósito se superpone con otras métricas existentes que permiten medir la misma información de manera efectiva.

Las especificaciones de los sensores de temperatura y presión han sido combinadas, dado que ambas deben alinearse con los mismos valores objetivo para asegurar la coherencia en el control del sistema.

La métrica referente a los sistemas de notificación ha sido revisada a raíz de la eliminación de la necesidad de monitoreo remoto externo. Anteriormente, esta métrica incluía opciones como alarmas remotas, mensajes de texto, así como notificaciones a través de plataformas como WhatsApp o Telegram, las cuales ya no son relevantes luego de este suceso.

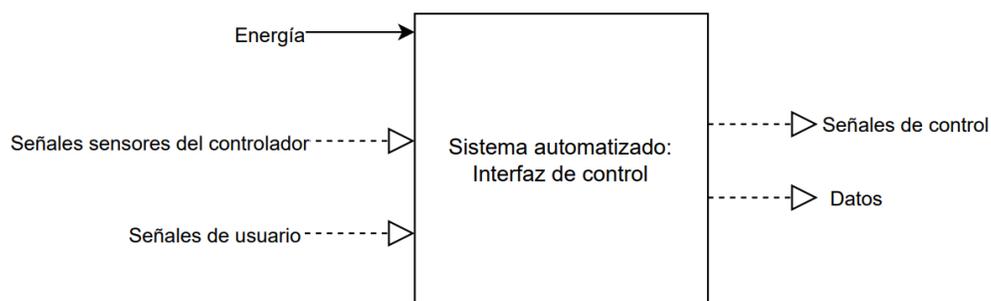
Adicionalmente, las especificaciones asociadas a los rangos de control de presión y temperatura se han ajustado después de una discusión interna entre el cliente y los interesados en el proyecto. Se mencionó inicialmente controlar temperaturas entre 20 °C - 600 °C y presión

entre 100 kPa y 1000 kPa, aunque luego de estas discusiones, se cambiaron a los vistos en la Tabla 3.5. Estos cambios reflejan las expectativas técnicas más precisas y realistas del sistema, asegurando que se alineen con los requisitos operativos del entorno.

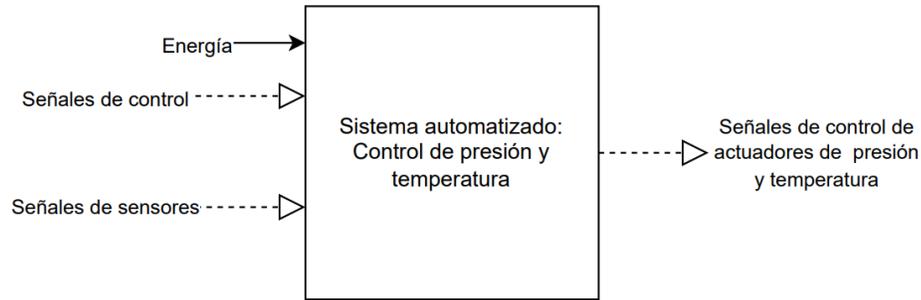
### 3.4 Generación de conceptos

Antes de hacer la generación de conceptos se deben identificar todas las funciones para proponer conceptos para cada una, para esto se hace una división funcional por bloques donde se van dividiendo las funciones en bloques más pequeños hasta llegar a un nivel donde se sea posible proponer conceptos que puedan solucionar cada una. Se inicia con un diagrama de primer nivel donde se identifican únicamente las entradas y salidas de sistema.

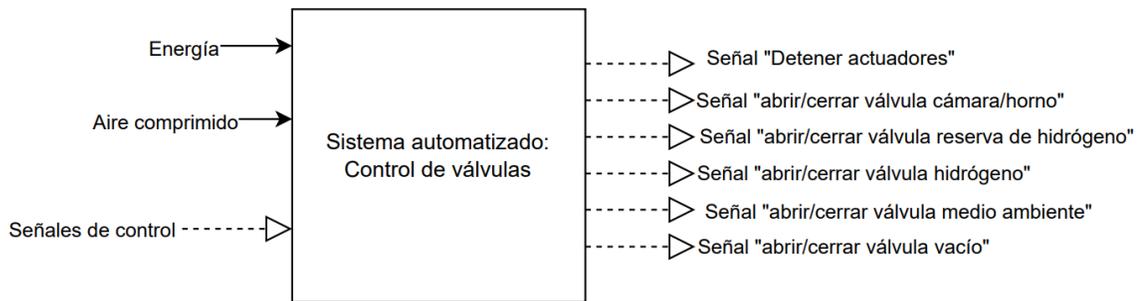
Para este proyecto, el problema se dividió en tres bloques principales. Interfaz de control, control de presión y temperatura, y control de válvulas. El primer bloque tiene que ver con el control que ejerce directamente el usuario sobre el sistema. Este se encarga del control y monitoreo directo (control y monitoreo de variables) e indirecto (descarga y extracción de datos) del sistema. El diagrama de descomposición funcional de primer nivel se puede observar en la Figura 3.2. El segundo bloque agrupa el control de la presión y la temperatura del sistema. Este bloque recibe señales de la interfaz y actúa sobre el sistema modificando la presión y temperatura según sea deseado. El diagrama de descomposición funcional de primer nivel de este bloque se puede observar en la Figura 3.3. Por último, el tercer bloque está enfocado en el control de las válvulas del sistema, el cual recibe señales de la interfaz de control para encender o apagar los actuadores. A este bloque le entra aire comprimido debido a que el manifold controla el paso del aire para accionar las válvulas neumáticas. El diagrama de descomposición funcional de primer nivel de este último bloque se puede observar en la Figura 3.4.



**Figura 3.2:** Diagrama de primer nivel del subproblema Interfaz de Control



**Figura 3.3:** Diagrama de primer nivel del subproblema Control de Presión y Temperatura



**Figura 3.4:** Diagrama de primer nivel del subproblema Control de Válvulas

Para los diagramas de segundo nivel se dividen los bloques de primer nivel en bloques pequeños donde cada uno representa una función específica.

Para el bloque de interfaz de control, se tiene dentro de las funciones que están conectadas con las entradas, se tienen la energía, señales de sensores del controlador y señales de usuario. Las salidas corresponden a las señales o indicaciones a los controladores correspondientes del sistema de válvulas y controles de presión y temperatura. En la Figura 3.5 se puede observar la descomposición funcional de segundo nivel para el bloque de Interfaz de control.

Para el bloque de control de temperatura y presión, se tiene dentro de las funciones que están conectadas con las entradas, se tienen la energía, señales de control provenientes del bloque de interfaz de control y las señales de los sensores de presión y temperatura. La salida del subsistema son las señales de activación de los actuadores de control. En la Figura 3.6 se puede observar la descomposición funcional de segundo nivel para el bloque de Interfaz de control.

Para el bloque de control de válvulas, se tiene dentro de las funciones que están conectadas con las entradas, se tienen la energía, el aire comprimido y las señales de control provenientes de la interfaz, mientras que sus salidas son todas las señales de encendido o apagado de las válvulas. En la Figura 3.7 se puede observar la descomposición funcional de segundo nivel para el bloque de Interfaz de control.

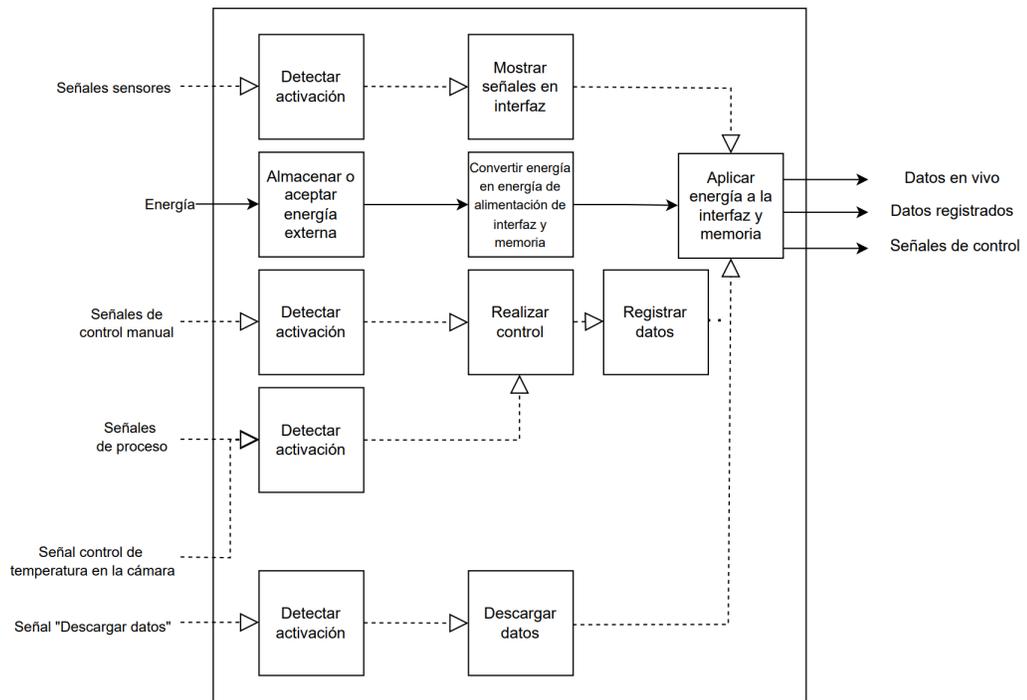


Figura 3.5: Diagrama de segundo nivel del subproblema Interfaz de Control.

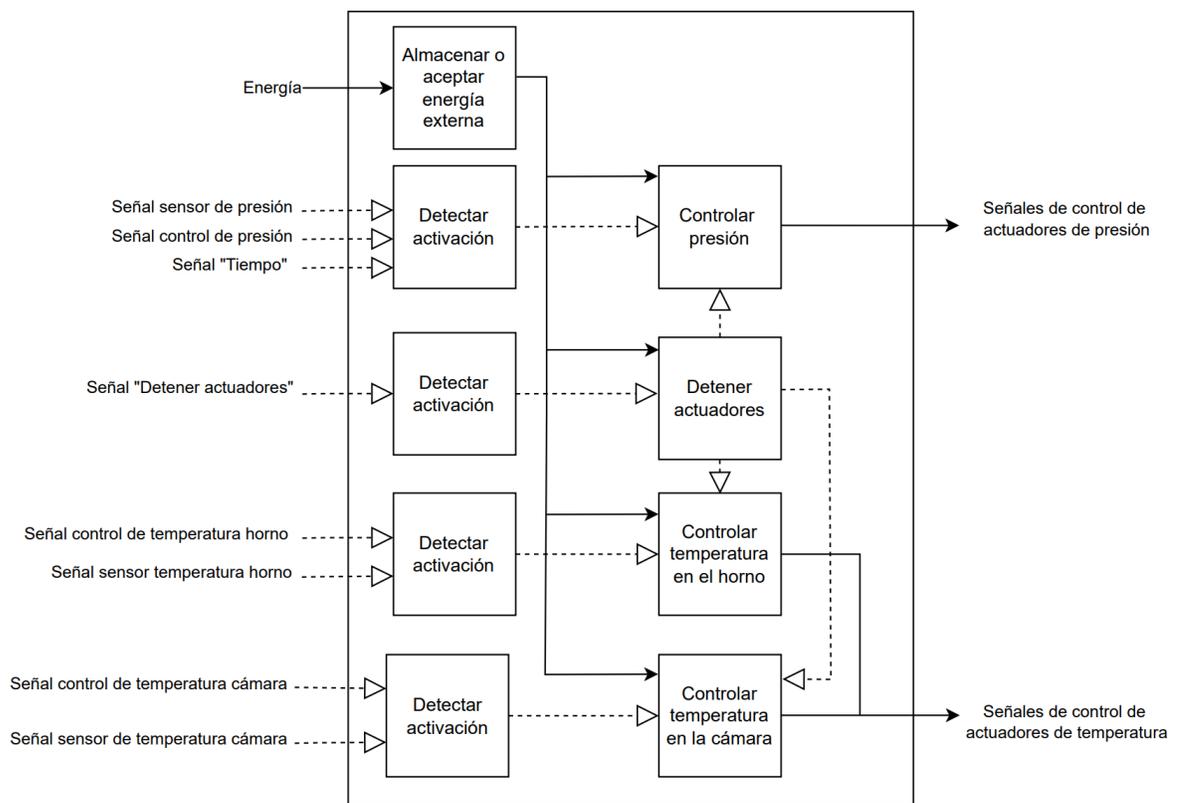
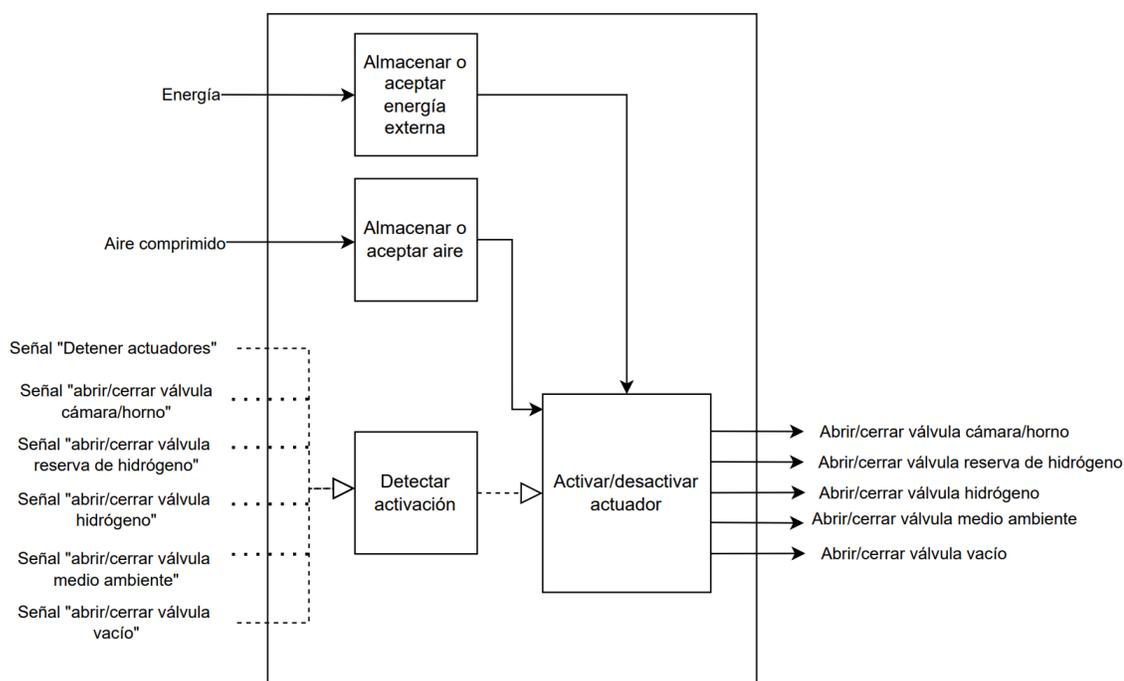


Figura 3.6: Diagrama de segundo nivel del subproblema Control de Presión y Temperatura.



**Figura 3.7:** Diagrama de segundo nivel del subproblema Control de Válvulas.

Con todas las posibles funciones identificadas y divididas se genera una lista de conceptos que puede dar solución a cada una de ellas. Para cada una se realizó una búsqueda interna con una lluvia de ideas a partir de la cual se generaron los primeros conceptos y después se complementó con una búsqueda externa para buscar posibles soluciones que hayan podido quedar por fuera durante esta primera búsqueda. Las combinaciones generadas para cada función de los tres subsistemas se pueden observar en las figuras del apéndice B. El análisis de sus características será analizado en la etapa de selección del concepto ganador del presente capítulo.

Algunas de las funciones están fuertemente limitadas debido a necesidades que fueron planteadas con el propósito de mantener compatibilidad y optimización del uso de recursos, como lo son:

Las funciones de almacenar o aceptar energía externa, detectar activación, registrar datos, mostrar señales en la interfaz y realizar control tienen que ver con cómo se adapta el sistema a la alimentación del laboratorio, cómo y qué se muestra en la interfaz y cómo controlar el sistema, según requisitos del cliente. Existen recursos disponibles como una PC de escritorio, un PLC con HMI y una Raspberry Pi, los cuales son capaces de ejecutar estas funciones independientemente o en trabajando en grupo. En el mercado se encontraron dispositivos que cumplen funciones similares como se mencionó en el capítulo anterior, sin embargo, son dispositivos mucho más sofisticados que implementan más componentes para realizar sus otras funciones y/o añadir características adicionales. Existe el aparato de Sievert, visto igualmente en el capítulo de teoría, el cual es la base de este equipo encontrado en el laboratorio. Este informe no especifica la totalidad de funciones del sistema, sino que se centra en el proceso de caracterización.

Además, la función de aplicar energía a la memoria de almacenamiento está directamente relacionada con el tipo de sistema de control que se utilice, los cuales dependen de los recursos del laboratorio, ya que si se utiliza una Raspberry Pi, por ejemplo, el tipo de memoria debe ser compatible con esta. También la función de convertir energía a energía de alimentación se ve afectada, ya que normalmente los dispositivos cuentan con convertidores o adaptadores propios.

La función de descargar de datos debe ser compatible con un formato de exportación compatible con herramientas de graficación, especialmente con Excel, según lo indicado por el cliente. Por lo tanto, según lo investigado en la web, existen los formatos .csv y .xlsx para esto.

Respecto a la comunicación serial entre la interfaz y los actuadores del sistema, ya se cuenta con un sensor de presión y dos controladores de temperatura que utilizan la comunicación RS-485, sin embargo, según lo explorado en el capítulo de teoría, existen otros candidatos como el RS-232 y el I2C. Esto limita fuertemente las funciones de controlar presión y temperatura, debido a que existen otras opciones como programar el controlador digitalmente para controlar las temperaturas o adquirir un regulador de presión digital para evitar la programación de este. Ambas opciones tienen sus ventajas y desventajas como se expone en la sección posterior.

En cuanto a los sensores de temperatura, ya se cuenta con termocuplas adaptadas a los controladores de temperatura, sin embargo, según la investigación expuesta, existen opciones como el RTD también. También, se cuenta con un calentador (resistencias eléctricas) para aumentar la temperatura, aunque existen métodos como la utilización de lámparas infrarrojas para el mismo fin. Además, existe un abanico para movilizar el aire caliente dentro de la cámara, sin embargo, existen también sistemas de ventilación especiales. Las diferencias entre la aplicación de los diferentes dispositivos en las diferentes funciones de aplicación de energía a sensores y actuadores, son expuestas en la sección de selección del concepto.

Finalmente, respecto a la función de aplicar energía de alimentación a las válvulas, se consultó con expertos en el área y se encontraron varias opciones como la utilización de relays o transistores, los cuales pueden ser controlados para indicar a las válvulas cuando abrirse y cuando cerrarse. Debido a que ya se cuenta con un manifold y válvulas neumáticas, se investigó en el mercado otras opciones entre las que se encontró la utilización de electroválvulas individuales. Más adelante se comparan estas opciones.

### 3.4.1 Reflexión

En el proceso de descomposición funcional del problema, se ha decidido eliminar el subproblema de alimentación del sistema. Aunque existen diversas señales de control con diferentes voltajes, la mayoría de los componentes requieren una alimentación de 110 V. Dado que esta uniformidad en el suministro de energía simplifica el diseño y la implementación del sistema, se considera innecesaria la inclusión de detalles adicionales sobre las variaciones de voltaje en la sección de alimentación.

## 3.5 Selección de concepto

En esta etapa se emplearon dos mecanismos principales. El primero consiste en un proceso de filtrado que permite eliminar los conceptos menos relevantes. El segundo es una matriz en la que se asigna un peso a cada criterio y se pondera cada combinación para identificar el concepto ganador.

Durante cada fase, se selecciona un concepto de referencia que sirve como base para comparar el rendimiento de las diferentes combinaciones en relación con cada criterio establecido. En la etapa de filtrado, se determina si el desempeño de cada concepto ha mejorado o empeorado, mientras que en la matriz final se asignan pesos y se otorgan valores entre uno y cinco a cada criterio.

La forma de calcular el "lugar" o posición de los conceptos difiere en ambas matrices: el filtrado utiliza la suma de los valores positivos y negativos, mientras que la matriz de selección aplica una suma ponderada de todos los criterios.

Estos criterios son asignados basándose en las necesidades identificadas, buscando todas aquellas que pueden verse afectadas por la selección de los conceptos y generando métricas que faciliten la comparación. En el caso de la matriz de selección, cada criterio recibe un peso que refleja la importancia de la necesidad, de modo que todos los pesos sumen un total de 100%. La clasificación se realiza asignando valores entre uno y cinco, que indican cómo se compara cada concepto con la referencia en cada criterio: un valor de 1 indica que es inferior a la referencia, 2 significa que es ligeramente inferior, 3 indica equivalencia, 4 es ligeramente superior y 5 significa que es mejor.

### 3.5.1 Interfaz de control

Como primer subsistema se analiza la interfaz de control. Primero, se genera la lista de combinaciones de la Tabla 3.6 mezclando los diferentes conceptos previamente generados, para esto utilizó criterio personal, ya que si se utilizaban todas las posibilidades se tendría que comparar una cantidad muy elevada de combinaciones, por lo que se conservaron las opciones que se consideraron más interesantes y se eliminaron las que no se consideraron adecuadas. A cada concepto se le asigna una letra, la cual se va a utilizar como identificador en las siguientes etapas. El concepto C fue elegido como referencia, ya que es el concepto que cuenta con menos cantidad de componentes.

**Tabla 3.6:** Conceptos generados para la interfaz de control.

<b>Conceptos Interfaz de Control</b>	
A	PC y Micro + Laboratorio y PC
B	Microprocesador + Laboratorio y Microprocesador
C	PLC + Generador y HMI
D	PC, Micro y PLC + Laboratorio y PC
E	Microprocesador y controlador + Laboratorio y Microprocesador
F	Microprocesador y controlador + Laboratorio y PC

Para la primera etapa de filtrado, se debe considerar que el sistema quiere ser replicado en un futuro, por lo que la utilización de un PLC aumenta los costos significativamente según lo discutido en la subsección 2.1.4, y debido a limitaciones de presupuesto, se descarta, y por lo tanto, todas las otras opciones pasan a ser mejores en esta primera etapa. Sin embargo, se compara igualmente para valorar si vale la pena la inversión en este concepto.

Cabe resaltar que el desarrollo de cualquiera de los conceptos generados tiene un valor económico inferior que a otros dispositivos presentes en el mercado como los dispositivos presentes en la subsección 2.1.5.

A continuación se presentan comparaciones entre los conceptos generados y la referencia, basándose en lo discutido en el capítulo 2.

- El uso de la interfaz es amigable con el usuario (SD amigable):
  - Conceptos A, D, E, F (PC y HMI): Permiten interfaces gráficas más personalizables y ricas en funcionalidades, lo que mejora la experiencia del usuario.
  - Concepto B (Microprocesador): Depende del diseño del software, pero es más limitado en términos de personalización y fluidez visual comparado con una PC.
- La SD notifica al usuario eventos de interés como errores o finalización del proceso:
  - Conceptos A, D, E, F (PC): Una PC bien programada puede ofrecer notificaciones personalizadas y automáticas de forma efectiva.
  - Concepto B: Similar, aunque las notificaciones podrían ser menos sofisticadas en microprocesadores sin una interfaz avanzada.
- Visualización de gráficas de temperatura y presión en tiempo real:
  - Conceptos A, D, E, F (PC): Las PC permiten el uso de software potente como Python, LabVIEW o Matlab para gráficos en tiempo real.
  - Concepto B: Posible pero más limitado, especialmente si el microprocesador no tiene suficiente capacidad para manejar gráficas complejas.
- Extracción de los datos obtenidos:

- Conceptos A, D, E, F (PC y CSV): Fácil extracción de datos a través de CSV u otros formatos para análisis externo.
- Concepto B: También permite extracción de datos, pero puede estar limitado por la interfaz del microprocesador.
- Registro y almacenamiento de datos en un formato compatible con herramientas de graficación:
  - Conceptos A, D, E, F (PC): Ofrecen mayor flexibilidad para registrar y almacenar datos en varios formatos, facilitando su uso en herramientas de análisis.
  - Concepto B: Menos capacidad para almacenar grandes volúmenes de datos o trabajar con formatos de archivo más sofisticados.
- Compatibilidad del sistema de alimentación con los recursos disponibles en el laboratorio:
  - Conceptos A, D, E, F: Usan alimentación estándar del laboratorio, lo cual los hace fácilmente compatibles.
  - Concepto B: También puede ser compatible, pero puede tener más limitaciones en cuanto a consumo energético.
- Fabricación dentro del margen del presupuesto deseado:
  - Concepto A (PC + Microcontrolador): Puede ser más costoso si la PC o el microcontrolador son de gama alta, pero en general, un sistema de PC de escritorio es económico.
  - Concepto B (Microprocesador): Esta opción es generalmente la más económica, ya que los microprocesadores cuestan menos que una PC completa.
  - Conceptos D, E, F (Microprocesador + Microcontrolador): Dependen de los componentes específicos, pero al tener microcontroladores adicionales, pueden ser más costosos que solo una PC o solo un microprocesador.

Los conceptos A, D, E y F pasan a la siguiente etapa.

La elección del formato de exportación se decanta por .CSV, debido a que este formato es más intuitivo para Excel a la hora de interpretar datos y hacer gráficas, además de ser la decisión final del cliente. Por lo tanto, no se consideraron las otras opciones como posibles candidatos para la solución de este subproblema.

En cuanto a la elección del protocolo de comunicación, se compararon los mencionados la subsección 2.4.1. Finalmente, se decide utilizar protocolo RS-485 debido a que cuenta con mejores características para un proceso industrial, además de la compatibilidad con los componentes actuales del sistema que se requieren reutilizar para la automatización.

La etapa de filtrado se observa en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Criterios de selección para la interfaz de control

<b>Conceptos (Interfaz de control)</b>						
<b>Criterios de selección</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C (Referencia)</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
El uso de la SD es amigable con el usuario	+	-	0	+	+	+
La SD notifica al usuario eventos de interés como errores en el proceso o finalización de este	0	0	0	0	0	0
La SD cuenta con una interfaz donde se visualizan gráficas de temperatura y presión en tiempo real	+	0	0	+	+	+
La SD permite la extracción de los datos obtenidos	+	0	0	+	+	+
La SD registra y almacena datos de temperatura, presión y tiempo, en un formato compatible con herramientas de graficación	+	+	0	+	+	+
El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio	+	+	0	+	+	+
La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado	+	+	0	+	+	+
<b>Suma +</b>	6	3	0	6	6	6
<b>Suma 0</b>	1	3	7	1	1	1
<b>Suma -</b>	0	1	0	0	0	0
<b>Evaluación neta</b>	6	2	0	6	6	6
<b>Lugar</b>	1	2	3	1	1	1
<b>¿Continuar?</b>	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí

Para la selección final se utiliza una referencia distinta, dado que la referencia inicial no pasó la primera etapa de filtrado. Se dejan los mismos criterios, pero esta vez se le asigna peso a cada uno basándose en la importancia de las necesidades que lo generaron. Los criterios con mayor peso asociado son los relacionados con la interfaz gráfica, registro de datos y el costo asociado al concepto, ya que se originaron de necesidades de importancia crítica. El resto de criterios de selección se divide entre los criterios originados de necesidades de menor importancia. Las calificaciones y los puntajes finales se muestran en la [Tabla 3.8](#).

A continuación se presentan comparaciones más detalladas entre los conceptos generados con la referencia.

- El uso de la interfaz es amigable con el usuario (SD amigable):
  - D (2): La combinación de un microcontrolador y un PLC añade una capa de

- complejidad.
- E y F (3): Muy similares a la referencia.
  - La SD notifica al usuario eventos de interés como errores o finalización del proceso:
    - Todos obtienen un 3, ya que dependen del software que se implemente para gestionar notificaciones.
  - Visualización de gráficas de temperatura y presión en tiempo real:
    - D y E: La interfaz basada en PC o monitor permite visualizar gráficas en tiempo real, aunque en el caso de E, el microprocesador puede mejorar el rendimiento.
    - F: Similar a E, aunque con una mayor capacidad de almacenamiento.
  - Extracción de los datos obtenidos:
    - E (4): Al ser más flexible en el uso de microprocesador y controladores, puede manejar mejor la extracción de datos.
    - D y F (3): Igual que A.
  - Registro y almacenamiento de datos en un formato compatible con herramientas de graficación:
    - E (4): Puede registrar y manejar datos con mayor flexibilidad gracias al microprocesador.
    - D y F (3): Iguales que A.
  - Compatibilidad del sistema de alimentación con los recursos disponibles en el laboratorio:
    - F (2): Utiliza un HDD, que requiere más energía y puede ser menos adecuado para las fuentes disponibles en el laboratorio.
  - Fabricación dentro del margen del presupuesto deseado:
    - D, E, F (2): Son más costosos debido a la complejidad añadida (PLC o microprocesadores más avanzados).

**Tabla 3.8:** Evaluación de conceptos para la interfaz de control

Criterios de selección	Peso	Concepto (Interfaz de control)							
		A (Referencia)		D		E		F	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Uso amigable (3)	10.34%	3	0.31	2	0.21	3	0.31	3	0.31
Notificación de eventos (3)	10.34%	3	0.31	3	0.31	3	0.31	3	0.31
Interfaz con gráficas (5)	17.24%	3	0.52	3	0.52	4	0.69	4	0.69
Extracción de datos (4)	13.79%	3	0.41	3	0.41	4	0.55	3	0.41
Registro y almacenamiento de datos (5)	17.24%	3	0.52	3	0.52	4	0.69	3	0.52
Sistema de alimentación (4)	13.79%	3	0.41	3	0.41	3	0.41	2	0.28
Presupuesto (5)	17.24%	3	0.52	2	0.34	2	0.34	2	0.34
	Total puntos		3.00		2.72		3.31		2.86
	Lugar		2		4		1		3
¿Continuar?		No		No		Desarrollar		No	

El Concepto E es el ganador con 3.31 puntos, destacándose por su flexibilidad en el manejo de datos, visualización en tiempo real y almacenamiento, lo cual es preferible según los criterios y pesos definidos; pero con un costo ligeramente superior. Sin embargo, el laboratorio ya cuenta con una Raspberry para la automatización, por lo que se alivianan los costos de este.

Luego de conversar con el cliente, este tiene conversaciones internas con otros interesados en el proyecto y finalmente se decide descartar esta opción, debido a que la Raspberry ya estaba destinada para otro proyecto y a la hora de replicar el sistema, el laboratorio cuenta con otra PC disponible para esto. Por lo tanto el puesto número 2 de la Tabla 3.8, es el que se va a desarrollar.

### 3.5.2 Control de presión y temperatura

Como segundo subsistema se analiza el control de presión y temperatura. Primero, se genera la lista de combinaciones de la Tabla 3.9 mezclando los diferentes conceptos previamente generados. Al igual que en la interfaz de control, se utilizó criterio personal por la razón mencionada previamente. Para este caso, el concepto A fue elegido como referencia, ya que parece ser un candidato parcial para comparar.

**Tabla 3.9:** Conceptos generados para el control de presión y temperatura.

Conceptos Control de Presión y Temperatura	
A	Laboratorio y PID + Regulador y Calentador
B	Laboratorio y Regulador digital + PID y Lámparas
C	Laboratorio y PID + Regulador, RTD y Lámparas
D	Laboratorio y Regulador digital + Regulador y Calentador
E	Laboratorio y PID + PID y Lámparas
F	Laboratorio y Regulador digital + Regulador, RTD y Lámparas

A continuación se presentan comparaciones entre los conceptos generados y la referencia, basándose en lo discutido en el capítulo 2, sobre todo en las subsecciones 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3.

- Permite retirar la muestra sin perder presión en la cámara:
  - B, D, F (Mejor): Al tener controladores digitales externos, es probable que gestionen la presión de forma más precisa y rápida, lo que facilita la retención de la presión al retirar la muestra.
  - C, E (Igual): Usan programación PID en microprocesadores, similar al concepto A, sin ventajas adicionales significativas.
- Control de un rango de presión de 0 a 4000 kPa:
  - B, D, F (Mejor): Al utilizar controladores digitales externos especializados, estos sistemas pueden manejar mejor el amplio rango de presión.

- C, E (Igual): Usan la misma estrategia que A con un controlador PID programado.
- Ejecución del proceso de limpieza del sistema:
  - B, D (Igual): Con controladores externos, pueden ejecutar la limpieza igual que A.
  - C, E, F (Peor): Las lámparas infrarrojas para el control de temperatura pueden no ser ideales para un proceso de limpieza comparado con resistencias eléctricas.
- Realización de la prueba de pérdidas de presión:
  - B, D, F (Mejor): Controladores digitales externos pueden detectar pérdidas de presión con mayor precisión.
  - C, E (Igual): Usan el mismo sistema PID programado que A.
- Obtención de datos mediante un proceso de caracterización definido:
  - C, E (Mejor): Utilizan RTD o programación PID que pueden ofrecer más precisión y flexibilidad para caracterización de materiales.
  - B, D, F (Igual): La diferencia no es significativa frente al concepto A.
- Compatibilidad del sistema de alimentación con los recursos del laboratorio:
  - Todos (Igual): Todos los conceptos almacenan y convierten energía utilizando convertidores, como en el concepto A.
- Control de un rango de temperatura de 25°C a 400°C en el horno:
  - D, F (Mejor): Utilizan resistencias eléctricas, más comunes para alcanzar y mantener temperaturas estables y altas.
  - B, C, E (Peor): Las lámparas infrarrojas pueden no ser tan efectivas para alcanzar temperaturas altas de manera precisa y estable.
- Mantiene la temperatura de la cámara constante:
  - D, F (Mejor): Resistencia eléctrica y un abanico aseguran estabilidad térmica.
  - B, C, E (Peor): Las lámparas infrarrojas pueden generar fluctuaciones o dificultades en mantener la temperatura constante.
- Mide presión con una precisión mínima de  $\pm 0.1$  kPa:
  - B, D, F (Mejor): Los controladores digitales externos pueden ofrecer mayor precisión que un sistema PID programado en microprocesadores.
  - C, E (Igual): Mantienen la misma precisión que A al usar transductores de presión con PID programado.
- Mide temperatura con una precisión mínima de  $\pm 0.1$  °C:

- C, F (Mejor): Los sensores RTD suelen ser más precisos que los termopares para mediciones de temperatura.
- B, D, E (Igual): Utilizan termopares, como en A.
- Dentro del margen del presupuesto deseado:
  - B, D, F (Peor): Los controladores digitales externos son generalmente más costosos.
  - C, E (Igual): Mantienen una estructura de costos similar al concepto A al utilizar más programación en lugar de hardware especializado.

Los conceptos B, D y F pasan a la siguiente etapa.

La selección de convertir energía a energía de alimentación se define en convertidores. Todos los dispositivos cuentan con su propio convertidor de alimentación, lo que descarta la opción de rectificadores.

La implementación del código PID en el microprocesador/microcontrolador decrementa la precisión del control respecto a uno ya hecho en el mercado, los cuales han sido probados y calibrados por profesionales en el área, y la precisión es una necesidad de importancia crítica para el cliente. Además, como se mencionó en la sección 2.1.3, el material  $LaNi_5$  requiere de un control preciso cuando se está manipulando a altas presiones.

La etapa de filtrado se observa en la Tabla 3.10.

Para la selección final se utiliza una referencia distinta, dado que la referencia inicial no pasó la primera etapa de filtrado. Se dejan los mismos criterios, pero esta vez se le asigna peso a cada uno basándose en la importancia de las necesidades que lo generaron. Los criterios con mayor peso asociado son los relacionados con el control de presión y temperatura, ejecución de los procesos especificados más adelante en las subsecciones 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5 y el costo del proyecto del capítulo 4. El resto de criterios de selección se divide entre los criterios originados de necesidades de menor importancia. Las calificaciones y los puntajes finales se muestran en la Tabla 3.11.

A continuación se presentan comparaciones más detalladas entre los conceptos generados y la referencia basadas en las secciones mencionadas del capítulo 2.

- La SD permite retirar la muestra sin perder la presión en la cámara (4), controlar un rango de presión de 0 kPa a 4000 kPa (5), ejecutar un proceso de limpieza del sistema (4), realizar un proceso de prueba de pérdidas de presión (4), obtención de datos mediante un proceso de caracterización definido por variación de presiones y temperatura (5), y compatibilidad del sistema de alimentación con los recursos disponibles en el laboratorio (4):
  - D y F (3): En todos estos criterios, la implementación de un regulador digital de presión y controladores de temperatura influye de la misma forma en los tres conceptos.

**Tabla 3.10:** Criterios de selección para el control de presión y temperatura

<b>Conceptos (Control de presión y temperatura)</b>						
<b>Criterios de selección</b>	<b>A (Referencia)</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
La SD permite retirar la muestra del sistema sin perder la presión en la cámara	0	+	0	+	0	+
La SD controla un rango de presión de 0 kPa a 4000 kPa	0	+	0	+	0	+
La SD ejecuta un proceso de limpieza del sistema	0	+	0	+	0	+
La SD realiza un proceso de prueba de pérdidas de presión	0	+	0	+	0	+
La SD obtiene datos de las variables críticas mediante un proceso de caracterización definido por variación de presiones y temperatura	0	0	0	0	0	0
El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio	0	0	0	0	0	0
La SD controla un rango de temperatura de 25 °C a 400 °C en el horno	0	-	0	0	-	0
La SD mantiene la temperatura de la cámara constante	0	-	-	0	-	-
La SD mide presión con una precisión mínima $\pm 0.1$ kPa	0	0	0	0	0	0
La SD mide la temperatura con una precisión mínima de $\pm 0.1$ °C	0	0	+	0	0	+
La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado	0	-	-	-	+	-
<b>Suma +</b>	0	4	1	4	1	5
<b>Suma 0</b>	11	4	8	6	8	4
<b>Suma -</b>	0	3	2	1	2	2
<b>Evaluación neta</b>	0	1	-1	3	-1	3
<b>Lugar</b>	3	2	4	1	4	1
<b>¿Continuar?</b>	No	Sí	No	Sí	No	Sí

- Control de un rango de temperatura de 25 °C a 400 °C en el horno (5)
  - D y F (4): Resistencias eléctricas permiten un control más preciso a altas temperaturas.
- Mantener la temperatura de la cámara constante (5)
  - D (5): La utilización de resistencias eléctricas (calentador) ofrecen mayor estabilidad que las lámparas infrarrojas.
  - F (4): RTD es más preciso que la termocupla, sin embargo, utiliza lámparas como actuadores.
- Medición de presión con una precisión mínima de  $\pm 0.1$  kPa (5)
  - D y F (3): Emplean el mismo tipo de sensor.
- Medición de temperatura con una precisión mínima de  $\pm 0.1$  °C (5)
  - D (3): Igual, ya que utiliza termopares.
  - F (4): RTD tiene mayor precisión en comparación con termopares.
- Margen del presupuesto deseado (5)
  - D (2): Utilizar un regulador aumenta el precio respecto a programar un PID en el software.
  - F (1): La utilización de un regulador digital y sensores RTD elevan mucho el costo de la implementación de la solución.

**Tabla 3.11:** Evaluación de conceptos para el control de presión y temperatura

Criterios de selección	Peso	Concepto (Control de presión y temperatura)					
		B (Referencia)		D		F	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Retirar muestra sin perder presión(4)	7.84%	3	0.24	3	0.24	3	0.24
Control de presión de 0 kPa a 4000 kPa (5)	9.80%	3	0.29	3	0.29	3	0.29
Proceso de limpieza del sistema (4)	7.84%	3	0.24	3	0.24	3	0.24
Proceso de prueba de pérdidas de presión. (4)	7.84%	3	0.24	3	0.24	3	0.24
Datos de variables críticas (5)	9.80%	3	0.29	3	0.29	3	0.29
Sistema de alimentación (4)	7.84%	3	0.24	3	0.24	3	0.24
Control de temperatura de 25 °C a 400 °C en el horno. (5)	9.80%	3	0.29	4	0.39	4	0.39
Temperatura de la cámara constante (5)	9.80%	3	0.29	5	0.49	4	0.39
Presión con una precisión mínima $\pm 0.1$ kPa (5)	9.80%	3	0.29	3	0.29	3	0.29
Temperatura con una precisión mínima de $\pm 0.1$ °C (5)	9.80%	3	0.29	3	0.29	4	0.39
Presupuesto (5)	9.80%	3	0.29	2	0.20	1	0.10
	Total puntos		3.00		3.20		3.10
	Lugar		3		1		2
	¿Continuar?		No		Desarrollar		No

El Concepto D es el ganador con 3.20 puntos, principalmente debido a su mayor precisión en la medición de temperatura y presión, además de su capacidad para mantener la temperatura estable, lo cual es preferible según los criterios y pesos definidos; sin embargo, con un costo ligeramente superior debido a la implementación de controladores y reguladores. Sin

embargo, el laboratorio ya cuenta con una Raspberry para la automatización, por lo que se alivianan los costos de este.

Luego de conversar con el cliente, este tiene conversaciones internas con otros interesados en el proyecto y finalmente se decide descartar la utilización del regulador de presión digital, pieza fundamental en la selección final del concepto ganador. El sistema requiere regulador que cuente con características muy específicas debido a la manipulación de hidrógeno y rangos de control; tal como se menciona en la subsección 2.1.2. Fue necesario, entonces, retornar a la Tabla 3.10 y revisar las opciones descartadas.

Debido a que un requisito fundamental del cliente es que se utilicen los recursos del laboratorio, para el control de temperatura se debe utilizar los controladores de temperatura que ya se encuentran en el sistema. Las opciones C y F sugieren utilizar un regulador de presión digital, lo cual ya ha sido descartado en este punto. Por lo tanto, se decidió conversar la opción A con el cliente, el cual estuvo de acuerdo en desarrollar este concepto, aparte que es compatible con el concepto ganador de la interfaz de control. Por lo tanto, este fue el concepto ganador.

### 3.5.3 Control de válvulas

Finalmente, para el tercer subsistema se analiza el control de las válvulas. Se genera la lista de combinaciones de la Tabla 3.12 mezclando los diferentes conceptos previamente generados, para esto utilizó criterio personal, ya que si se utilizaban todas las posibilidades se tendría que comparar una cantidad muy elevada de combinaciones, por lo que se conservaron las opciones que se consideraron más interesantes y se eliminaron las que no se consideraron adecuadas. A cada concepto se le asigna una letra, la cual se va a utilizar como identificador en las siguientes etapas. El concepto A fue elegido como referencia.

**Tabla 3.12:** Conceptos generados para el control de válvulas.

Conceptos Control de Válvulas	
A	Relays + Manifold
B	Relays + Electroválvulas
C	Transistores + Manifold
D	Transistores + Electroválvulas

Para la primera etapa de filtrado, la energía externa del sistema debe provenir del laboratorio por requisito del cliente, además de que esta es la opción más económica y eficiente, por lo tanto, se restringe la selección creando combinaciones considerando la necesidad del cliente.

A continuación se presentan comparaciones entre los conceptos generados y la referencia, basándose en lo discutido en la sección 2.2 presentada en el capítulo de teoría.

- La SD minimiza desperdicios de hidrógeno por errores humanos

- B: Mejor. Las electroválvulas pueden controlarse con mayor precisión de forma automática, lo que reduce el margen de error humano en comparación con las válvulas neumáticas.
- C: Mejor. Al igual que en el concepto B, las electroválvulas automatizadas minimizan errores humanos en la operación.
- D: Igual. Utiliza también un manifold con válvulas neumáticas, por lo que tiene las mismas limitaciones que el concepto A.
- El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos
  - B: Igual. Usa los mismos componentes que el concepto A (alimentación del laboratorio y relés).
  - C: Peor. El uso de transistores para convertir la energía puede requerir una adaptación adicional en el laboratorio, dependiendo de la infraestructura disponible.
  - D: Peor. Similar a C, ya que los transistores pueden no ser tan compatibles con la infraestructura actual del laboratorio.
- La SD reduce el tiempo necesario para ejecutar el proceso
  - B: Mejor. Las electroválvulas permiten un control más rápido y automático, lo que reduce el tiempo de ejecución del proceso.
  - C: Igual. La implementación de los componentes de ambos componentes dan una respuesta muy similar
  - D: Mejor. Al igual que el concepto B, las electroválvulas permiten una mayor velocidad en la operación del sistema.
- La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado
  - B: Peor. Las electroválvulas suelen ser más caras que las válvulas neumáticas, lo que aumenta los costos de fabricación.
  - C: Peor. Al igual que en B, el uso de electroválvulas y transistores eleva los costos en comparación con el sistema de A.
  - D: Igual. El uso de transistores podría aumentar el costo ligeramente, pero al utilizar también válvulas neumáticas, el costo es similar al concepto A.

Los conceptos A y B pasan a la siguiente etapa.

La etapa de filtrado se observa en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13:** Criterios de selección para el control de válvulas

<b>Conceptos (Control de válvulas)</b>				
<b>Criterios de selección</b>	<b>A (Referencia)</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
La SD minimiza desperdicios de hidrógeno por errores humanos	0	+	+	0
El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio	0	0	-	-
La SD reduce el tiempo necesario para ejecutar el proceso	0	+	0	+
La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado	0	-	-	0
<b>Suma +</b>	0	2	1	1
<b>Suma 0</b>	4	1	1	2
<b>Suma -</b>	0	1	2	1
<b>Evaluación neta</b>	0	1	-1	0
<b>Lugar</b>	2	1	3	2
<b>¿Continuar?</b>	Sí	Sí	No	No

Para la selección final se utiliza una referencia distinta, con el fin de ser neutral en la toma de decisiones. Se dejan los mismos criterios, pero esta vez se le asigna peso a cada uno basándose en la importancia de las necesidades que lo generaron. Los criterios con mayor peso asociado son los relacionados con minimización de desperdicios y costo de implementación. El resto de criterios de selección se divide entre los criterios originados de necesidades de menor importancia. Las calificaciones y los puntajes finales se muestran en la Tabla 3.14.

A continuación se presentan comparaciones más detalladas entre los conceptos generados y la referencia, basándose en lo visto en el capítulo de teoría.

- La SD minimiza desperdicios de hidrógeno por errores humanos (5)
  - A (2): Usa un manifold y válvulas neumáticas, lo que implica mayor intervención manual, aumentando el riesgo de errores humanos. Es peor que B, ya que la operación es menos automatizada
  - B (Referencia, 3): Electroválvulas controladas automáticamente, lo que reduce el riesgo de errores humanos.
- El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio (4)
  - A (4): Usa relés y alimentación del laboratorio, similar al concepto B. Ambos son compatibles con los recursos actuales.
  - B (Referencia, 4): También utiliza relés y la misma alimentación, por lo que es compatible con los recursos disponibles.

- La SD reduce el tiempo necesario para ejecutar el proceso (4)
  - A (2): El uso de válvulas neumáticas y un manifold implican más tiempo en comparación con un sistema que utilice un solo componente.
  - B (Referencia, 3): Al usar solo una electroválvula automatizada, el tiempo necesario para el proceso es menor.
- La SD es fabricada dentro del margen del presupuesto deseado (5)
  - A (4): El sistema de manifold y válvulas neumáticas es más económico que las electroválvulas, lo que permite mantenerse dentro del presupuesto más fácilmente.
  - B (Referencia, 3): Las electroválvulas son más caras, lo que eleva el costo total del sistema.

**Tabla 3.14:** Evaluación de conceptos para el control de válvulas

Criterios de selección	Peso	Concepto (Control de válvulas)			
		A		B (Referencia)	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Minimización de desperdicios (5)	27.78%	2	0.56	3	0.83
Sistema de alimentación (4)	22.22%	4	0.89	4	0.89
Reducción de tiempo (4)	22.22%	2	0.44	3	0.67
Presupuesto (5)	27.78%	4	1.11	3	0.83
	Total puntos		3.00		3.22
	Lugar		2		1
¿Continuar?		Desarrollar		No	

El Concepto B es el ganador con 3.22 puntos, debido a su automatización, que reduce los errores humanos y el tiempo de ejecución. Sin embargo, el Concepto A es más económico y también es compatible con los recursos disponibles, lo cual es preferible según los criterios y pesos definidos.

Luego de conversar con el cliente, este tiene conversaciones internas con otros interesados en el proyecto y finalmente se decide optar por no desarrollar el concepto B debido a que el laboratorio ya cuenta con un manifold y válvulas neumáticas para el proyecto. Por lo tanto, el concepto por desarrollar es el concepto A.

### 3.5.4 Reflexión

La selección de conceptos se llevó a cabo mediante un enfoque estructurado, utilizando un proceso de filtrado inicial seguido por una evaluación a través de una matriz ponderada. Esta metodología permitió reducir de manera efectiva el número de combinaciones potenciales, eliminando aquellos conceptos que no aportaban suficiente valor y centrándose en los más

prometedores. En la etapa de filtrado, la referencia seleccionada sirvió como base para comparar el desempeño de cada combinación en los criterios definidos, facilitando la toma de decisiones en cuanto a qué conceptos continuar evaluando.

El uso de pesos en la matriz de selección permitió que cada criterio fuese evaluado de acuerdo a su relevancia, de manera que los conceptos no solo se calificaron en función de su desempeño relativo, sino también de su capacidad para cumplir con las necesidades más importantes del proyecto. Este enfoque permitió priorizar los aspectos clave del diseño, como la usabilidad y el control de presión y temperatura, asegurando que el concepto ganador fuera el más equilibrado en términos de funcionalidad y eficiencia.

En términos de los subsistemas, se tomó en cuenta la complejidad de las combinaciones posibles y se optó por utilizar un criterio personal para reducir la cantidad de opciones, simplificando así la evaluación sin perder de vista las necesidades críticas. Esto resultó en un enfoque más manejable, al tiempo que se mantuvo la rigurosidad en la selección del concepto final.

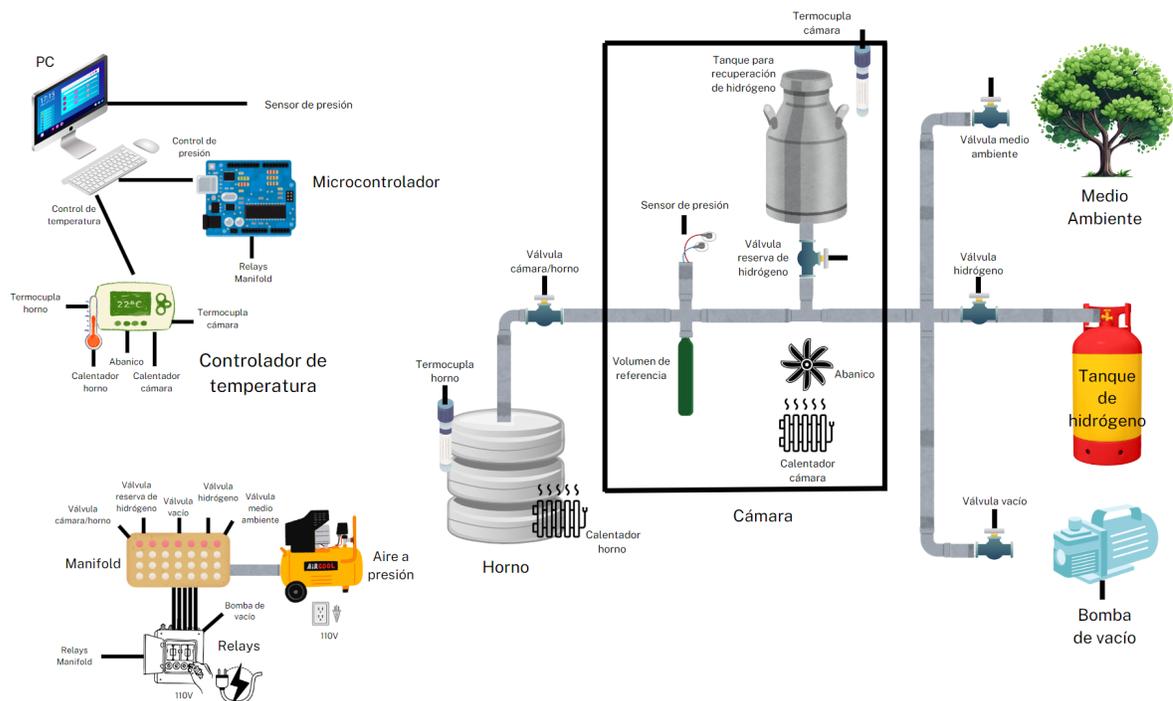
### 3.6 Concepto ganador

Recapitulando lo discutido hasta el momento y analizando las soluciones propuestas, se ha procesado la información de las necesidades y se ha determinado que el proyecto requiere un dispositivo capaz de cumplir con las siguientes características fundamentales:

- **Control de variables críticas:** El dispositivo debe gestionar de manera eficiente tanto la presión como la temperatura dentro del sistema. Esto implica contar con un control preciso que permita trabajar dentro de un rango definido, de acuerdo con las especificaciones establecidas para el proyecto, particularmente en las fases de caracterización de materiales.
- **Interfaz de usuario intuitiva:** Se debe proporcionar una interfaz de control amigable y fácil de usar, que facilite el monitoreo y ajuste de las variables de manera sencilla, asegurando que el usuario pueda interactuar con el sistema sin complejidad, optimizando así la productividad y minimizando errores humanos.
- **Capacidad de monitoreo remoto:** A pesar de que inicialmente se contempló una opción de monitoreo externo mediante notificaciones, se ha ajustado la necesidad, eliminando la dependencia de alarmas remotas o aplicaciones de terceros, como WhatsApp o Telegram. Sin embargo, el sistema debe seguir proporcionando la posibilidad de alertar localmente al usuario cuando ocurran eventos críticos.
- **Robustez y fiabilidad:** El dispositivo debe ser robusto para operar en entornos industriales o de laboratorio, donde las condiciones pueden ser exigentes. Esto incluye no solo la durabilidad del hardware, sino también la estabilidad del software para garantizar que el sistema funcione sin interrupciones y pueda reaccionar de manera predecible frente a variaciones.

- **Facilidad de integración:** Finalmente, debe ser capaz de integrarse con los sistemas ya existentes, como los controladores PID o los sensores instalados, asegurando una interacción fluida entre los diferentes componentes y procesos que forman parte del sistema de caracterización.

El concepto que mejor cumplió con estas características y que mejor se acopla con los intereses de la empresa es el que está compuesto por la combinación del concepto A de la Tabla 3.6, el concepto A de la Tabla 3.9 y el concepto A de la Tabla 3.12. Para facilitar la visualización del concepto ganador se construye el diagrama de la Figura 3.8, el cual muestra un boceto de cómo sería la distribución de estos componentes. Cabe mencionar que la posición exacta de cada componente y las dimensiones pueden variar en la solución final.



**Figura 3.8:** Boceto del concepto ganador.

Con el concepto ganador elegido se realiza la propuesta de diseño definida en el siguiente capítulo.

# Capítulo 4

## Diseño del sistema automatizado

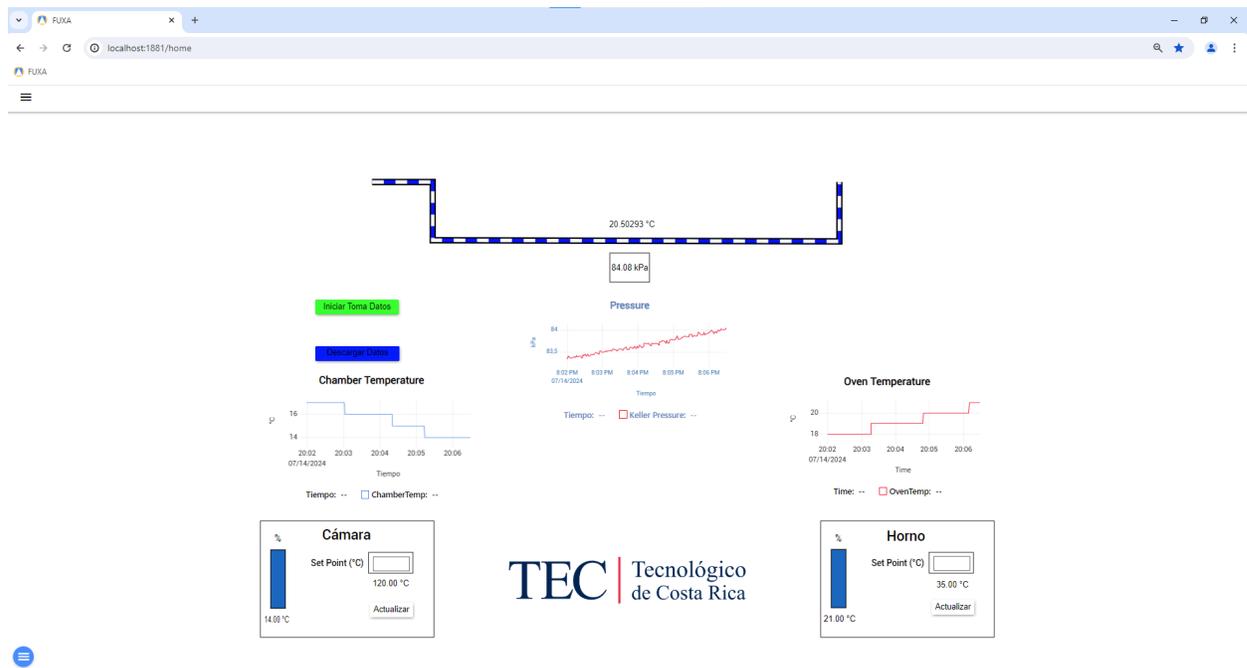
La solución de este proyecto busca dotar al Centro de Investigación en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) con un sistema automatizado para caracterizar niveles de hidrógeno en materiales. Esto agilizará el trabajo y mejorará la efectividad y calidad de las investigaciones del centro.

Este capítulo comprende varias secciones. La sección 4.1 comprende el diseño de la interfaz de control, desde los requisitos, entorno de programación y procesos que deben ser ejecutables desde esta. Seguidamente, en la sección 4.2, se seleccionan las válvulas y controlador a implementar en la solución. En la sección 4.3 se justifica la implementación de un control por histéresis, el tipo de sensor implementado y cómo se desarrolla un control de presión por histéresis. La sección 4.4 contiene información sobre cómo se adaptan los controladores escogidos a la interfaz de control implementada. A continuación, en la sección 4.5 se diseña una carcasa/contenedor para guardar los dispositivos electrónicos que se están añadiendo al sistema. Finalmente, en la sección 4.6 se explican las consideraciones de seguridad que se tienen en cuenta a la hora de diseñar el sistema y la lógica de programación.

### 4.1 Diseño de interfaz de control

#### 4.1.1 Identificación de requerimientos

Primeramente, se deben identificar los componentes que requiere la interfaz. En la Figura 4.1 se muestra la interfaz con la que cuenta el sistema antes de la implementación de la solución. Esta contiene una buena base para identificar los componentes requeridos y oportunidades de mejora. Se deben tomar en cuenta las funcionalidades que esta ya tiene y se deben incorporar en el nuevo diseño. Con este sistema, solamente se pueden registrar y descargar datos, controlar temperaturas y observar gráficas de presión y temperatura. Por lo tanto, son funciones que se deben mantener en la nueva interfaz.



**Figura 4.1:** Interfaz del sistema manual basada en HTML y JavaScript.

El sistema debe ser capaz de realizar tres procesos: limpieza o purga del sistema, caracterización del material y pruebas de pérdidas de presión. Se describen en las subsecciones 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5 más adelante. La interfaz debe ser capaz de controlar y monitorear estos procesos. Además, se debe agregar una pestaña en la que las válvulas del sistema puedan ser controladas manualmente. Estos procesos deben ser programados en la PC ubicada en el CIEMTEC, según requisitos del cliente, en una DELL OPTIPLEX 7060 SSF Intel Core I7-87 [48]. Además, esta PC es compatible con el protocolo RS-485, característica importante como se define en las secciones 4.3.3 y 4.4.1.

## 4.1.2 Escogencia de entorno de programación

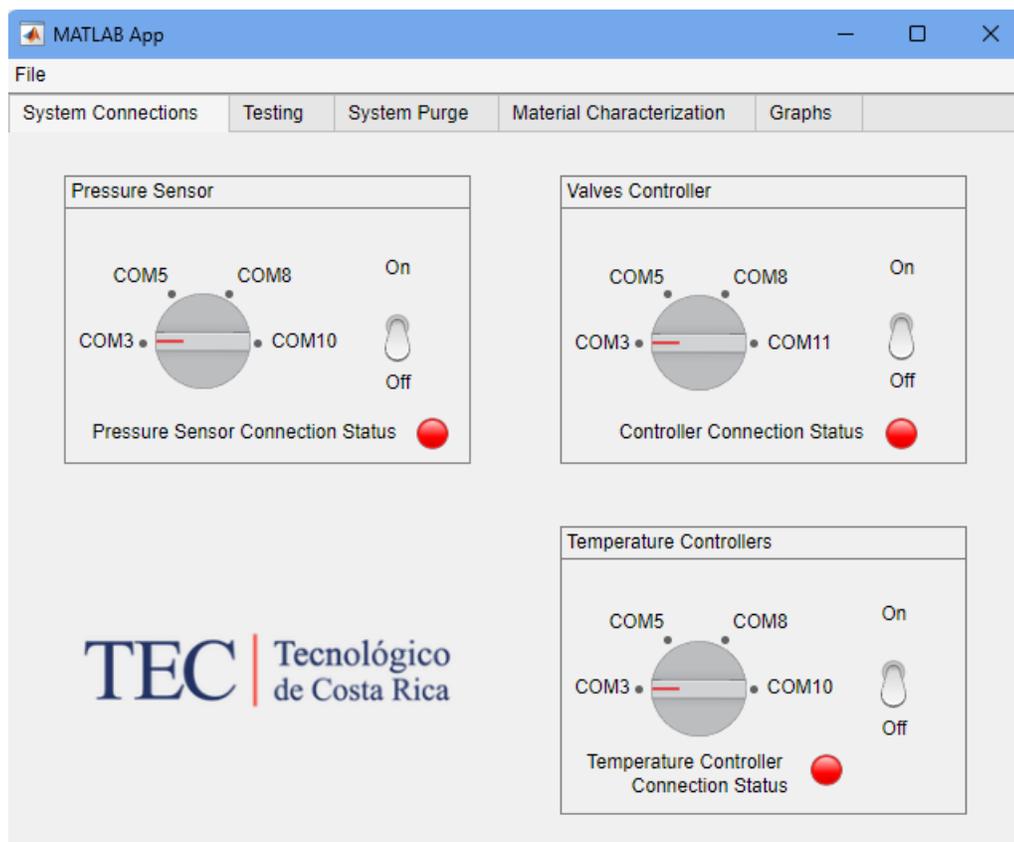
Existen varios lenguajes de programación que permiten la creación de interfaces de control para los sistemas vistos en la sección 2.1.4. En la Figura 4.1 se muestra la comparación de siete lenguajes de programación diferentes con los que se puede crear la interfaz [49][50].

**Tabla 4.1:** Comparación de lenguajes de programación para la creación de interfaces de control.

Lenguaje de Programación	Propósito Principal	Ventajas en Ciberseguridad o Control	Desventajas	Compatible con PC (Sí/No)
Python	Scripting y automatización de tareas	Amplia biblioteca para análisis forense, redes, hacking ético; GUI (Tkinter, PyQt)	Puede ser lento en ejecución	Sí
C/C++	Desarrollo de software de bajo nivel	Eficiencia y control directo de memoria	Complejidad en manejo de memoria	Sí
JavaScript	Desarrollo web	Interacción en tiempo real en aplicaciones web; frameworks UI	Seguridad limitada en navegadores	Sí
PowerShell	Administración de sistemas Windows	Scripting de administración robusto	Solo en ambiente Windows	No
Ruby	Desarrollo web y scripting	Rápido prototipado y automatización	Rendimiento menor que otros	Sí
Assembly	Desarrollo de software de bajo nivel	Control absoluto sobre hardware, buen rendimiento	Complejidad, bajo nivel de abstracción	No
MATLAB	Análisis de datos y modelado matemático	Herramientas de simulación y control (Simulink); facilidad para visualización gráfica	Licencia costosa y menor flexibilidad que Python	Sí

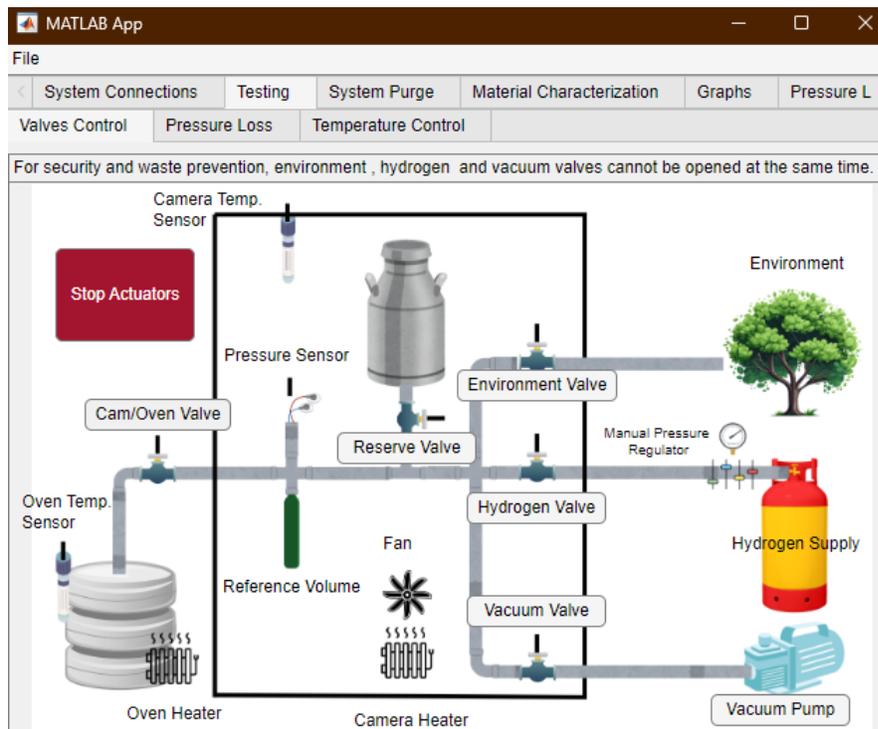
Python o MATLAB son las opciones más fuertes para una interfaz de control en PC. Python es más flexible y compatible con múltiples entornos de software, mientras que MATLAB facilita la simulación y análisis de sistemas de control en ingeniería, además de tener módulos como Simulink para modelado detallado. Se comenta con el cliente y se opta por MATLAB, debido a su familiaridad con el personal del CIEMTEC, además de que se cuenta con licencias institucionales para el uso oficial del software. Sin embargo, la utilización de Python no se descarta del todo debido a su versatilidad en cuanto a comunicaciones seriales. En el apéndice D en la sección D.3 se encuentra el código implementado utilizando la herramienta de App Designer de MATLAB. Además, en la sección D.2 se encuentra el código de Python implementado.

A la hora de diseñar la interfaz, se toman en cuenta 5 pestañas principales. La primera (System connections) contiene información sobre las conexiones del sistema, así se puede saber si algún componente está fallando su comunicación. En la Figura 4.2 se observa la pestaña de comunicaciones del sistema.

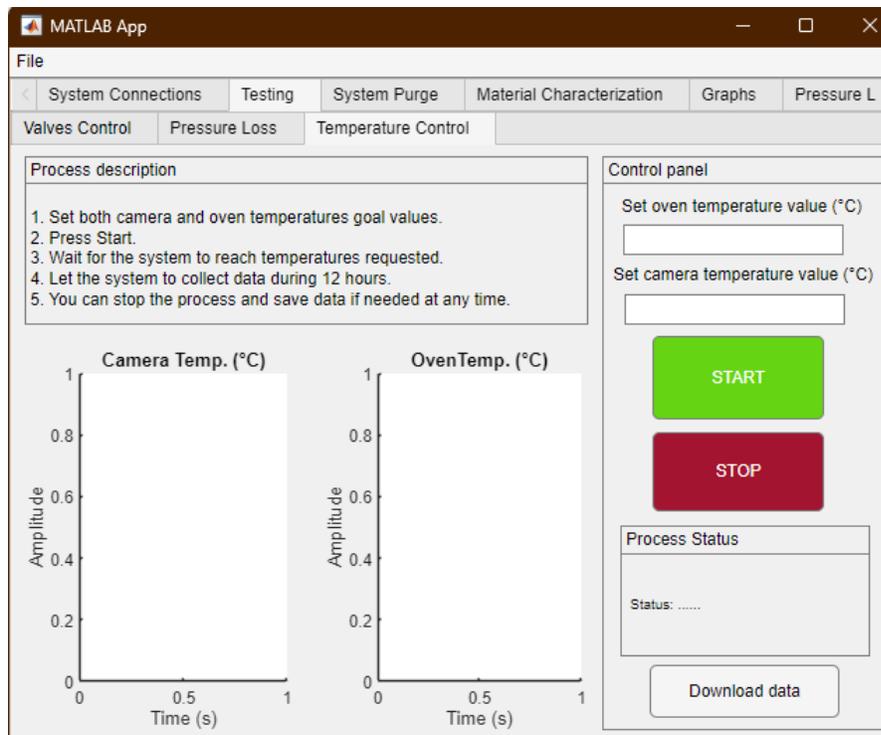


**Figura 4.2:** Interfaz del sistema automático, pestaña de conexiones.

La pestaña de pruebas contiene 3 tipos de pruebas. En las Figuras 4.3 y 4.4 se observan las sub pestañas correspondientes a las pruebas que se le pueden realizar al sistema.



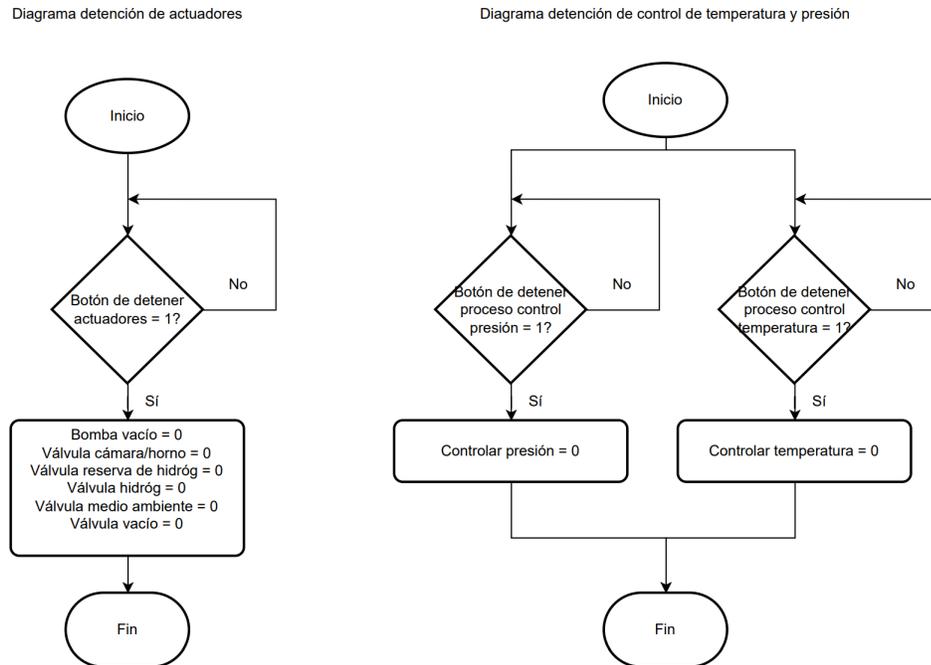
**Figura 4.3:** Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de control de válvulas y bomba de vacío.



**Figura 4.4:** Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de control de temperaturas.

Las pestañas de purga del sistema (System Purge), caracterización de material (Material Characterization), gráficas (Graphs) y prueba de pérdida de presión (Pressure Loss Test) en

la pestaña de pruebas (Testing) son parte de los procesos que se deben ejecutar. Además, cada pestaña tiene su respectivo botón de paro de emergencia, ya sea para detener un proceso o simplemente hacer pruebas. En la Figura 4.5 se aprecian dos diagramas de flujo que corresponden a la detención del sistema según la necesidad de paro.



**Figura 4.5:** Diagramas de flujo de los procesos de detención de actuadores del sistema.

### 4.1.3 Proceso de limpieza del sistema

El proceso de limpieza o purga del sistema consiste en la esterilización del sistema con hidrógeno. Como se mencionó en la sección 2.1.2, el hidrógeno a altas presiones, junto con oxígeno y una fuente de ignición, pueden provocar una explosión al generar llama. Por lo tanto, el proceso de purga es de vital importancia para eliminar la mayor parte de partículas de oxígeno dentro del sistema.

Se debe tener en cuenta que la bomba empleada en el sistema, tiene como limitación, el valor de presión a la que puede generar vacío. Esta bomba puede generar vacío a partir de una presión máxima de 101,3 kPa (presión atmosférica), por lo que el diseño del proceso automático debe considerar este paso antes de ejecutar un ciclo de vacío.

En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo del proceso de purga del sistema. Además, en la Figura 4.7 se muestra la pestaña de la interfaz de control que permite la ejecución de este proceso.

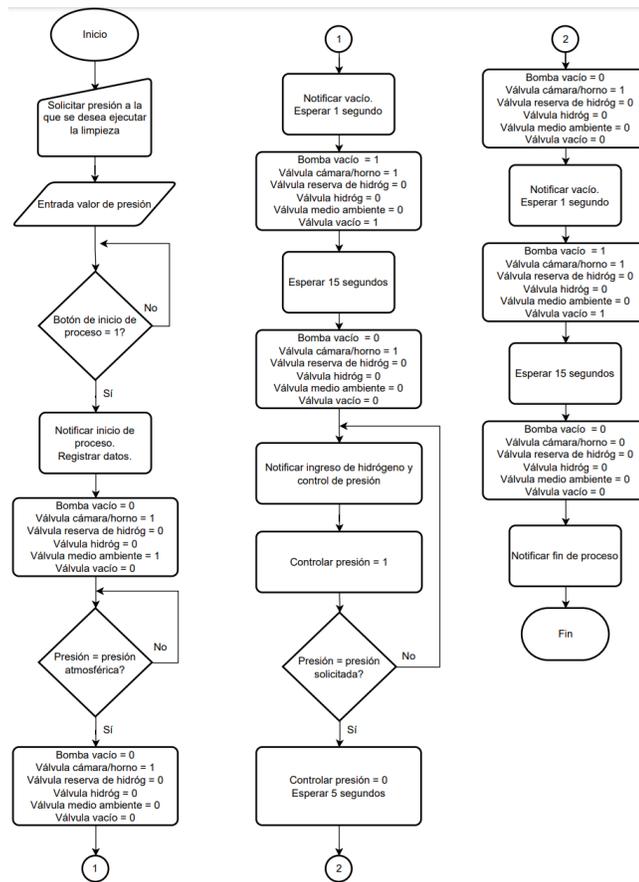


Figura 4.6: Diagrama de flujo del proceso de purga del sistema

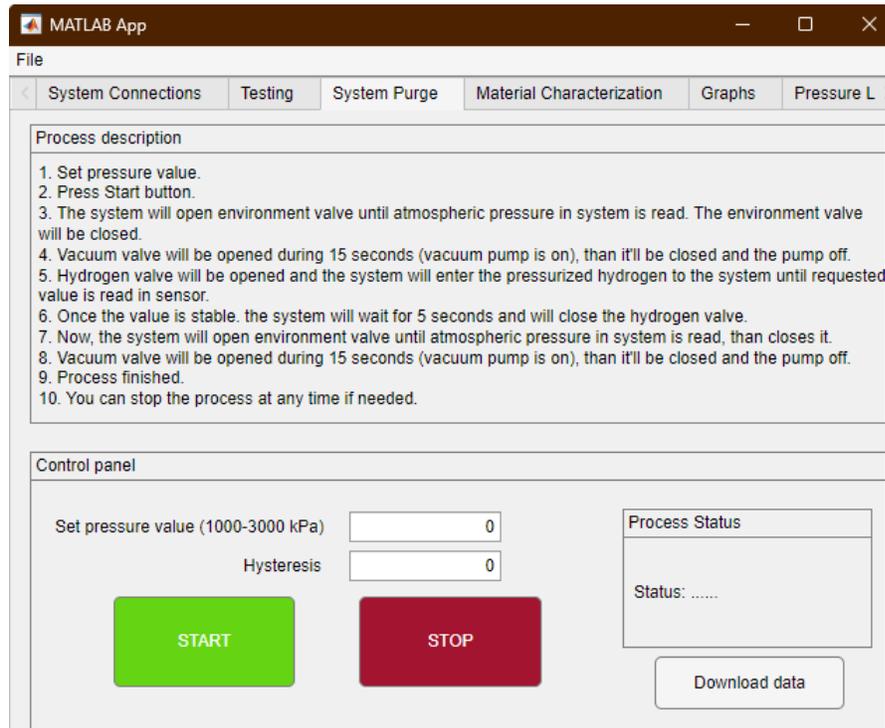
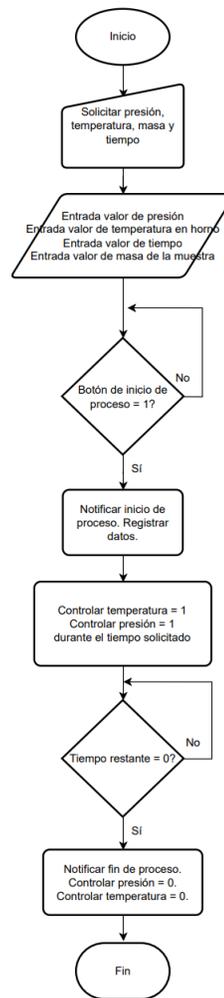


Figura 4.7: Interfaz del sistema automático, pestaña de purga del sistema.

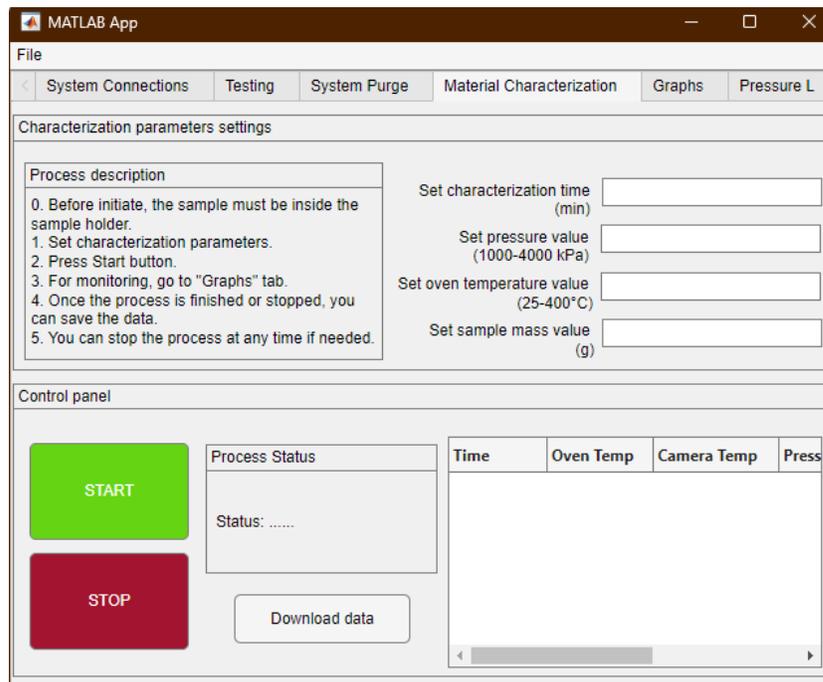
#### 4.1.4 Proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales

El proceso de caracterización, como se mencionó anteriormente, consiste en inyectar hidrógeno a cierta presión, durante cierto tiempo a una muestra que se calienta a cierta temperatura. Este proceso debe ejecutar registrar datos de presión, temperaturas, tiempo y el resultado de la Ecuación 2.1 cada cierto tiempo. En la Figura 4.8 se observa el diagrama de flujo del proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales.



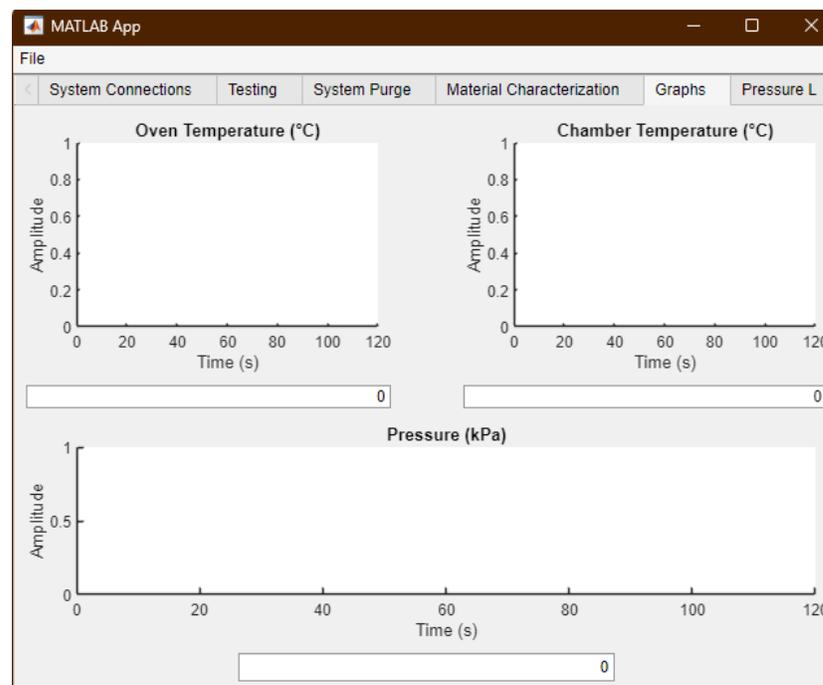
**Figura 4.8:** Diagrama de flujo del proceso de caracterización del material.

Como se describió en el capítulo 2, el proceso de caracterización de materiales comprende la absorción y desorción de hidrógeno en un material. Para iniciar con este proceso, debemos asegurarnos de que el sistema esté esterilizado como vimos en la sección 4.1.3. Por lo tanto, la puesta en marcha de este proceso incorpora la ejecución del proceso de limpieza y el establecimiento de los parámetros en la pestaña de caracterización, la cual se puede observar en la Figura 4.9. El tiempo de ejecución de la puesta en marcha del sistema se tomará más adelante para validar la implementación del sistema automatizado en el capítulo 5 de resultados y análisis.



**Figura 4.9:** Interfaz del sistema automático, pestaña de caracterización de material.

Además, durante la ejecución del proceso, se pueden consultar las gráficas de presión, temperatura en la cámara y temperatura en el horno en la pestaña de gráficas observada en la Figura 4.10.



**Figura 4.10:** Interfaz del sistema automático, pestaña de gráficas, presión y temperaturas en el sistema.

### 4.1.5 Proceso de prueba de pérdidas de presión

El proceso de pruebas de pérdidas de presión es fundamental para valorar si existen fugas en el sistema. El proceso consiste en llevar el sistema a una presión establecida por el usuario y monitorear la presión en este. Se recomienda monitorear el sistema por al menos 24 horas, según recomendaciones de los expertos del CIEMTEC. En la Figura 4.11 se observa el diagrama de flujo para este proceso. Además, en la Figura 4.12 se observa la pestaña de control del proceso automatizado.

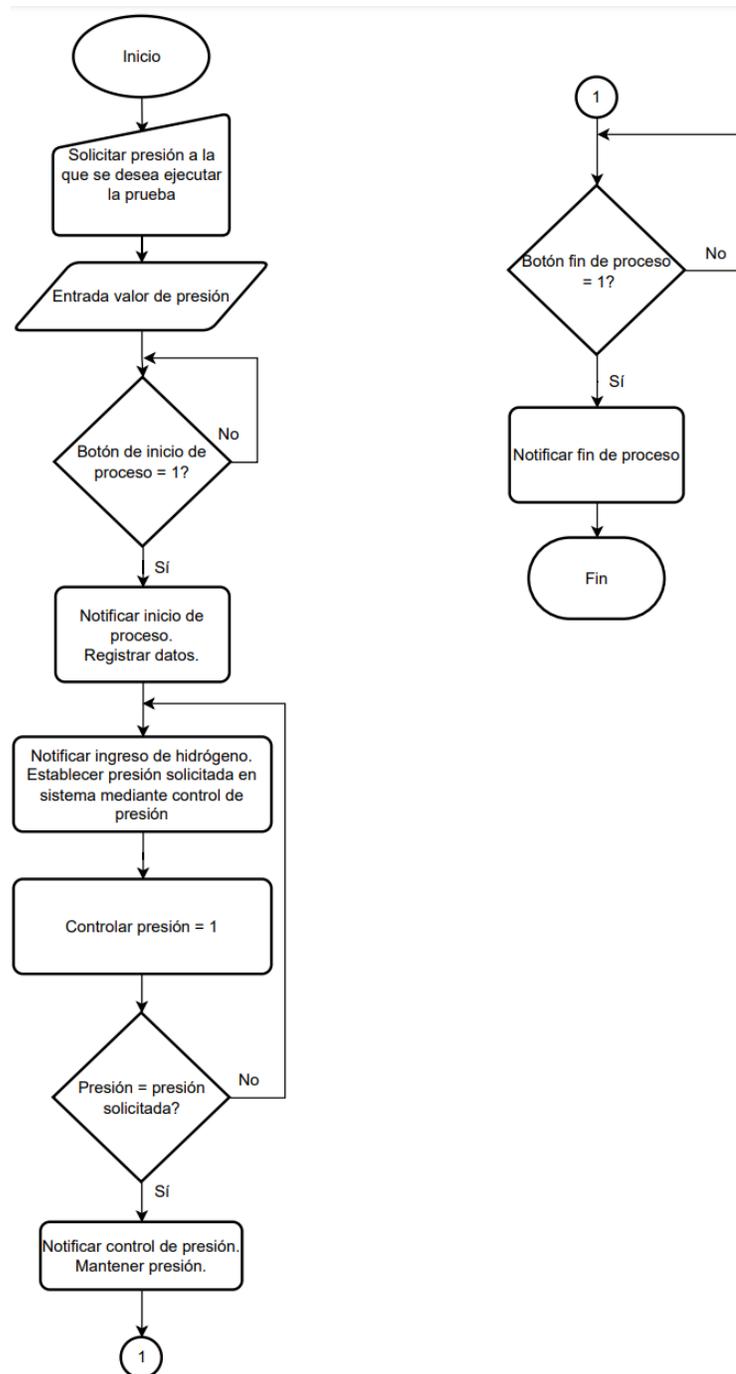
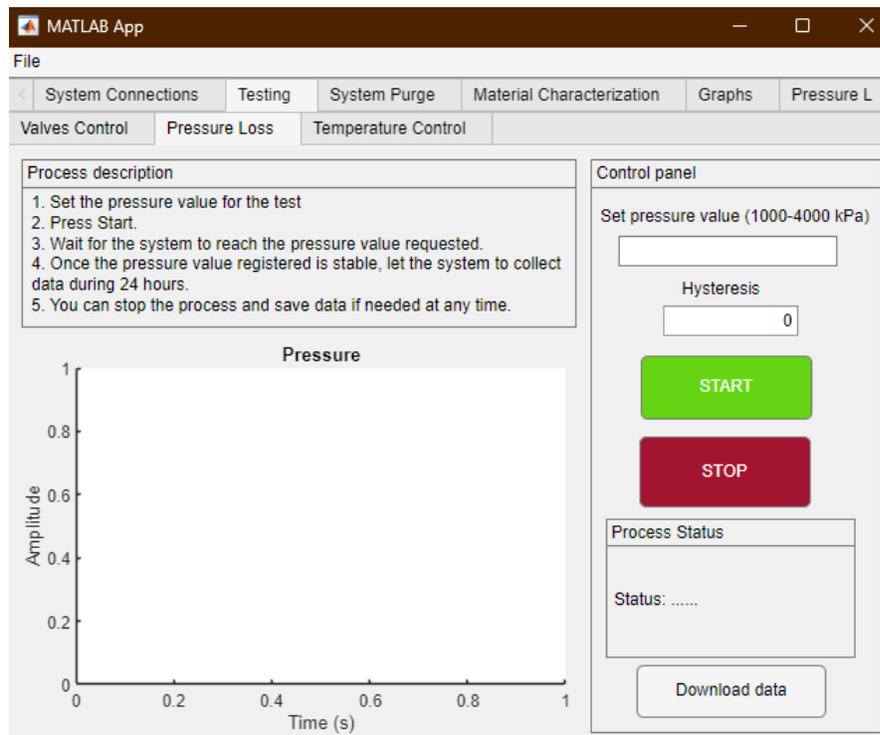


Figura 4.11: Diagrama de flujo del proceso de prueba de pérdida de presión.



**Figura 4.12:** Interfaz del sistema automático, pestaña de prueba de pérdidas de presión.

## 4.2 Diseño del control de válvulas

Como se observó en la sección 3.6, las válvulas del sistema serán controladas desde la interfaz gráfica mediante un controlador. Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente, se utilizan relés capaces de soportar este voltaje y corriente, los cuales permiten el paso de la señal de control hacia los solenoides de las electroválvulas del manifold, mediante el accionamiento del controlador. El manifold tiene como objetivo controlar el paso de aire presurizado hacia las válvulas neumáticas con el fin de activarlas o desactivarlas. En las subsecciones 4.2.1 y 4.2.2 se describen los componentes utilizados en el control de válvulas.

En el apéndice E en las secciones E.1 y E.2 se observan los planos electroneumáticos de control de válvulas y eléctricos de conexiones del microcontrolador. Cabe resaltar que el plano presentado para las conexiones de las válvulas está representado para una sola. Cada relé del plano de conexiones del microcontrolador va a un relé del plano electroneumático.

### 4.2.1 Selección de válvulas

Las condiciones de trabajo de interés para la escogencia de las válvulas involucran como medio el hidrógeno, temperatura de trabajo a medio a ambiente, presión de entrada de 13 000 kPa dada por el tanque de hidrógeno, presión dentro del sistema entre 0 - 4000 kPa y tubería del sistema de 1/4 de pulgada.

El laboratorio cuenta con un manifold marca MiCRO compuesto por cinco electroválvulas

5/2, reacción a resorte. Debido a que se quiere controlar el paso de aire hacia las válvulas neumáticas, para la implementación física, se deben ajustar las entradas y salidas del bloque con el fin de convertirlas en electroválvulas 3/2. Estas electroválvulas cuentan con solenoides modelo 0 200 001 202. El manifold se observa en la Figura 4.13 y tiene las siguientes especificaciones:

- Presión de servicio: 2.5 bar a 10 bar.
- Señal de activación: 110 V 50/60 Hz.
- Potencia: 4.5 VA.
- Medio: Aire.
- Normalmente abierta o cerrada dependiendo de configuración de tapones en salidas.



**Figura 4.13:** Manifold MiCRO.

Además, en la Figura 4.14 se observan las válvulas neumáticas Swagelok SS-HBS4-C con las que cuenta el laboratorio. Estas cuentan con las siguientes especificaciones:

- Presión de actuación: 2.1 bar a 7.5 bar.
- Temperatura: -40 °C a 37 °C.
- Presión de servicio: 241 bar máximo.
- Medio: Gases.
- Normalmente cerrada. Apertura a 5 bar según hoja de datos.



**Figura 4.14:** Válvulas neumáticas Swagelok SS-HBS4-C.

Es crucial asegurar que las válvulas estén dimensionadas correctamente para manejar la presión del sistema, especialmente cuando se trabaja con gases como el hidrógeno, que puede volverse peligroso si la presión no se controla adecuadamente. Para este caso, controlar la activación de las válvulas neumáticas mediante el uso del manifold es viable. Además, se utilizará manguera neumática para aire comprimido 10 Bar de 1/4 pulg.

En lugar de la combinación de manifold más válvulas neumáticas, existe otro candidato más simple de implementar. La válvula de émbolo de 2/2 vías de acción directa hasta 900 bar – Tipo 6080, observada en la Figura 4.15, cuenta con las características mencionadas anteriormente para la sustitución de las válvulas manuales y podrían ser controladas mediante relés igualmente [51]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el CIEMTEC ya cuenta con un el sistema de válvulas, por lo que con el fin de aprovechar los recursos del laboratorio, la escogencia de estas válvulas queda descartada [51]. Además, el precio de cada válvula de émbolo hace que la implementación de estas se salga del presupuesto del cliente.



**Figura 4.15:** Válvula de émbolo de 2/2 vías de acción directa hasta 900 bar – Tipo 6080.

## 4.2.2 Selección de controlador

Como se observó en la sección 3.6, el controlador se encarga de enviar señales al manifold con el fin de controlar el paso de aire. Con el fin de abaratar los costos, se comparan dos microcontroladores muy conocidos en la Tabla 4.2. Se necesitan controlar las cinco electroválvulas del manifold y la bomba de vacío.

**Tabla 4.2:** Comparación de microcontroladores para la implementación de control de válvulas.

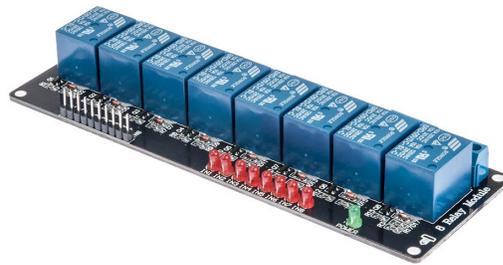
Característica	Arduino UNO	ESP32-WROOM	Comentario
Arquitectura	AVR, 8-bit	Xtensa dual-core, 32-bit	ESP32 es mucho más rápido y potente.
Velocidad de CPU	16 MHz	160 MHz (puede alcanzar hasta 240 MHz)	La velocidad de ESP32 facilita el manejo de múltiples tareas.
Voltaje de operación	5V	3.3V	Se necesita adaptación de voltaje para el módulo de relés.
Cantidad de GPIO	14 digitales, 6 analógicas	30-36 digitales, 18 ADC	ESP32 ofrece más pines, útil si se expanden los controles.
Capacidad de corriente en GPIO	Hasta 40 mA	Hasta 12 mA por pin (max 120 mA total)	Arduino puede manejar más corriente directamente.
Soporte Wi-Fi/Bluetooth	No	Sí, Wi-Fi y Bluetooth	ESP32 es útil para conectar MATLAB remotamente o en red.
Soporte en MATLAB	Sí, pero limitado para MATLAB IO	Sí, con soporte para IoT y MATLAB para control	ESP32 tiene compatibilidad IoT nativa con MATLAB.
RAM	2 KB	520 KB	ESP32 permite procesamiento de datos y tareas más complejas.
Memoria Flash	32 KB	4 MB (o más según la versión)	ESP32 puede almacenar más código y bibliotecas.
Consumo de energía	Bajo	Moderado (mayor cuando Wi-Fi/Bluetooth está activo)	ESP32 consume más pero ofrece conectividad inalámbrica.
Costo estimado	10–15 USD	5–10 USD	Ambos son asequibles; ESP32 es más económico en general.
Programación de MATLAB	Compatible con MATLAB Arduino Support Package	Compatible con MATLAB IoT (MATLAB y Simulink)	ESP32 facilita la conexión y control desde MATLAB.

Para el control de un manifold y de dispositivos mediante relés, el ESP32-WROOM es una opción óptima debido a su capacidad de procesamiento, mayor cantidad de pines GPIO, y compatibilidad con Wi-Fi/Bluetooth, lo que facilita la integración y control desde MATLAB de forma inalámbrica. Además, su memoria adicional y velocidad permiten un control más preciso y eficiente de múltiples dispositivos, sin embargo, la PC del laboratorio no cuenta con conexión a internet ni bluetooth, por lo que es igual que el Arduino en este aspecto. Además, el CIEMTEC ya cuenta con un Arduino UNO, el cual también puede ser utilizado sin problemas, sobre todo porque no requiere adaptación de alimentación con el módulo de relés. Por lo tanto, el Arduino UNO es el controlador que se escoge.

El módulo de relés a utilizar es el módulo de relés de 8 canales de SainSmart, debido a que utiliza 5 V como señal de control, compatible con el Arduino UNO [52]. Además, los dos relés que sobran pueden ser utilizados en un futuro en caso de añadir más válvulas en futuro. En las Figuras 4.16 y 4.17 se observan el microcontrolador y módulo de relés implementados para controlar el manifold. En el apéndice D en la sección D.1 se puede observar la programación implementada en el microcontrolador utilizado.



**Figura 4.16:** Arduino UNO.



**Figura 4.17:** Módulo de relés de 8 canales marca SainSmart.

En el apéndice E en la sección E.2 se observan los planos de conexiones del microcontrolador.

Además, se debe añadir alguna capa de protección contra interferencias o electromagnetismo por parte del Arduino y los solenoides de las electroválvulas del manifold. Por lo tanto, una opción muy económica y viable es la utilización de un soporte de madera para el manifold y tapones de hule-espuma tanto para el manifold, como para la carcasa mencionada en la sección 4.5.1.

Por último, se debe considerar una fuente de alimentación externa para el Arduino, debido a que por sí mismo no puede suministrar suficiente corriente para activar o desactivar los relés del módulo de relés correctamente. También, se debe considerar una fuente externa de alimentación para el módulo, debido a que no se recomienda utilizar un microcontrolador como fuente de alimentación, sino, como controlador solamente. Las tierras de estas fuentes deben estar compartidas.

## 4.3 Diseño de control de presión

### 4.3.1 Selección de control de presión

Como se mencionó en el capítulo 3, el concepto ganador observado en la Figura 3.8 implementa un control digital de presión mediante software programado. Como se mencionó

en el capítulo teórico en la sección 2.3.4, un control por histéresis es útil cuando se tienen actuadores ON/OFF.

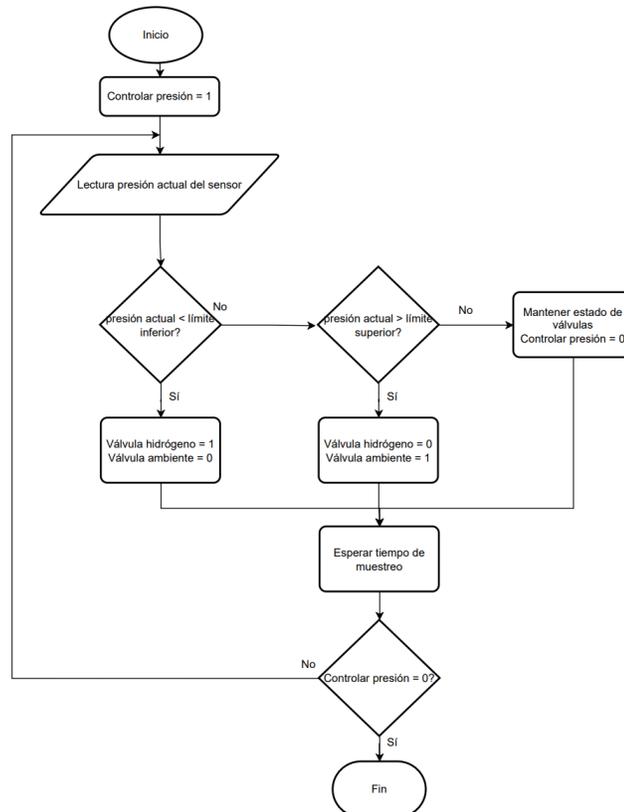
El CIEMTEC cuenta con licencias de MATLAB, por lo que se puede habilitar el programa en la PC del laboratorio. Gracias a la gran capacidad de procesamiento de la PC, se puede programar un control por histéresis en esta.

### 4.3.2 Control por histéresis

Para implementar el control, debemos tener un valor de entrada para comparar con el valor deseado. Este valor de entrada lo da el sensor de presión; con base en este valor, el controlador es capaz de enviar señales para abrir y cerrar las válvulas de ingreso de hidrógeno y escape al medio ambiente, con el fin de estabilizar la presión en el sistema. Como se mencionó en el capítulo 2 en la sección 2.3.4, se debe establecer un valor de histéresis con el fin de evitar fluctuaciones cerca del "setpoint".

Este valor de histéresis debe ser ajustado mediante pruebas al sistema. El tiempo de respuesta del regulador programado depende tanto del valor de histéresis, como de la capacidad física de los elementos involucrados en el control, en este caso, la capacidad del sensor de enviar datos y la capacidad del controlador para recibir las señales de apertura o cierre de válvulas.

En la Figura 4.18 se observa el código del controlador de presión desarrollado.



**Figura 4.18:** Diagrama de flujo del controlador ON-OFF por histéresis.

### 4.3.3 Selección del sensor de presión

El laboratorio cuenta con un sensor de presión KELLER Serie 33X con un convertidor A/D K-114 para la obtención de datos registrados por el sensor. Cuenta con interfaz RS-485, comunicación óptima según lo discutido en la sección 2.4.1, compatible con MATLAB mediante herramientas como Instrument Control Toolbox, que facilita el uso de puertos seriales para interactuar con dispositivos industriales y sensores de este tipo.



**Figura 4.19:** Transmisor de presión KELLER Serie 33X con interfaz RS-485.



**Figura 4.20:** Convertidor A/D K-114 con interfaz RS-485 a través de USB.

Existen otras opciones más económicas que cumplen los requisitos mencionados al inicio de la sección, como los sensores Ashcroft G2 y WIKA A-10 de Cole-Palmer observados en las

Figuras 4.21 y 4.22 respectivamente [53][54]. Sin embargo, la precisión del sensor ubicado actualmente en el CIEMTEC es mucho mejor y la utilización de recursos disponibles en el laboratorio limita la escogencia al sensor Keller.



**Figura 4.21:** Sensor de presión Ashcroft G2 Cole-Palmer.



**Figura 4.22:** Sensor de presión WIKA A-10 Cole-Palmer.

## 4.4 Control de temperaturas

### 4.4.1 Selección de control de temperatura

Como se mencionó en el capítulo 3, el concepto ganador observado en la Figura 3.8 implementa controladores digitales de temperatura para la cámara y el horno. El equipo existente en CIEMTEC, cuenta con controladores de temperatura PID de alta velocidad Serie TK4 Autonics. Estos controladores tienen salida de comunicación RS-485 (Modbus RTU) y son compatibles con 6 tipos de RTD y 13 tipos de termopares diferentes. Cuenta con varios tipos de control, como el ON/OFF, P, PI, PD y PID. Según lo discutido en la sección 2.3.3, estableceremos el control PID en los controladores [55].

Además, el sistema cuenta con termopares en J, los cuales cumplen los requisitos de precisión de sensor de temperatura solicitados por el cliente, aparte que ya es un recurso disponible del laboratorio. En las Figuras 4.23 y 4.24 se encuentran los controladores y sensores de temperatura mencionados.



**Figura 4.23:** Controlador de temperatura PID de alto rendimiento Serie TK. Autonics



**Figura 4.24:** Termopar Tipo J Bulbo 0°C 450°C.

Otras opciones disponibles en el mercado son los controladores modelo E5CC-QX2ASM-800 de OMRON observados en la Figura 4.25 [56], el controlador UDC3500 DIN Controller de Honeywell Industrial Automation observado en la Figura 4.26 [57] y el controlador PID de temperatura de OMEGA observado en la Figura 4.27 [58]. Estos controladores tienen funciones similares, cumpliendo con las limitaciones solicitadas por el cliente, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se utilizarán los TK4 de Autonics por disponibilidad de recursos.



**Figura 4.25:** Controlador de temperatura E5CC-QX2ASM-800 de OMRON.



Figura 4.26: UDC3500 DIN Controller de Honeywell Industrial Automation.



Figura 4.27: Controlador PID de temperatura de OMEGA.

## 4.5 Diseño mecánico

### 4.5.1 Diseño de carcasa

Respecto al diseño mecánico, se crea una carcasa para almacenar los componentes electrónicos añadidos al sistema. El diseño de esta contempla la integración del módulo de relés, el Arduino UNO y una placa en la que se optimiza la manipulación de la conexión de las fuentes de alimentación a los dispositivos. En el apéndice E en la sección E.3 se pueden observar los planos de las piezas para la construcción de la carcasa.

En la Figura 4.28 se puede observar un modelado 3D de la carcasa creado en SOLIDWORKS 2024. Los modelos del Arduino, del módulo de relés y la placa, fueron tomados de GRAB-CAD Community [59].

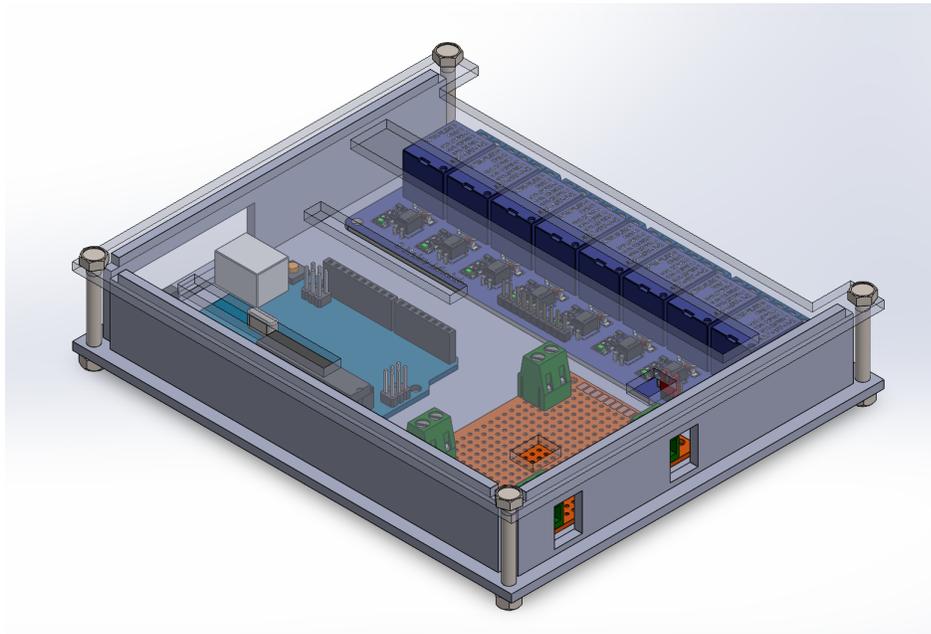


Figura 4.28: Carcasa contenedora de dispositivos electrónicos diseñada en SOLIDWORKS 2024.

#### 4.5.2 Cambio de manguera

El sistema actual cuenta con una manguera más larga de lo necesario y aparte no es adecuada para la manipulación de hidrógeno. Debido a un accidente presentado durante una prueba a lata presión, esta se decide cambiar. La manguera en cuestión se observa en la Figura 4.29.



Figura 4.29: Manguera plástica implementada en el sistema previo a la realización del proyecto.

Siguiendo la recomendación de un especialista en sistemas de fluido, se cambia la manguera plástica por tubería de acero inoxidable, formando lo que comúnmente se conoce como "rabo de chanco". Esto permite que el gas fluya de mejor forma y no existan quiebres bruscos en donde haya concentración de esfuerzos por parte del gas. En la Figura 4.30 se encuentra el cambio realizado al sistema.



**Figura 4.30:** Conexión entre tanque de hidrógeno y sistema con conexión de tubería de acero inoxidable.

## 4.6 Seguridad en el sistema

En las Tablas 4.3 y 4.4 se pueden observar las consideraciones de seguridad a la hora de manipular las válvulas del sistema. Por medida de seguridad, la programación dependiente de las válvulas de ambiente, hidrógeno y vacío, es fundamental en la implementación del control de válvulas. Estas consideraciones se encuentran en el código empleado visto en las secciones 4.1 y 4.2.

**Tabla 4.3:** Configuración de válvulas parte 1.

Válvula medio ambiente	Válvula hidrógeno	Válvula vacío	Comentarios
0 = OFF	0	0	Mantiene presión
0	0	1 = ON	Evacúa presión. ADVERTENCIA. Si se evacúa a una presión mayor a 101.3 kPa se podría dañar la bomba
0	1	0	Ingresa presión
0	1	1	PELIGRO. Bomba puede dañarse y desperdicio de hidrógeno.
1	0	0	Evacúa presión. ADVERTENCIA. Si se evacúa a una presión mayor a los 5000 kPa podría provocar llamas.
1	0	1	PELIGRO. Bomba de vacío puede dañarse.
1	1	0	PELIGRO. Desperdicio de hidrógeno.
1	1	1	PELIGRO. Bomba puede dañarse y desperdicio de hidrógeno.

**Tabla 4.4:** Configuración de válvulas parte 2.

Válvula cámara/horno	Válvula reserva hidrógeno	Comentarios
0	0	Presión se mantiene en la cámara.
0	1	Ingresa presión extra.
1	0	Ingresa presión al horno.
1	1	Ingresa presión extra al horno.

Además, es fundamental contar botones de paro de emergencia en las pestañas de la interfaz a realizar, con el fin de detener los procesos y los actuadores del sistema. Estos pueden ser observados en las figuras de la sección 4.1. También se decide programar los procesos automáticos que involucran el manejo de presión, de tal forma que no sea posible ejecutar otro proceso que altere el actual, a menos que se detenga el proceso debidamente mediante los botones de detención de proceso.

Para evitar accidentes, el proceso de control de temperatura está programado de tal forma que, al finalizar, apaga los calentadores para reducir la temperatura hasta la temperatura ambiente. Además, la entrada de datos está validada para que solo se puedan ingresar valores dentro de los rangos permitidos. Lo mismo para los procesos que involucran control de presión.

Las válvulas neumáticas son normalmente cerradas, por lo que un fallo en el sistema de control de estas, haría que la válvula se quede cerrada. Por lo tanto, como medida de seguridad, se decide dejar las válvulas manuales en el sistema, colocadas paralelamente con las válvulas neumáticas y cerradas. De esta forma, si una válvula neumática queda inhabilitada, manualmente se puede seguir utilizando el sistema, con la condición de la manipulación manual de esta.

Considerando un fallo en el Arduino, se decide utilizar una regleta en la que deben estar conectadas las fuentes de alimentación del Arduino, módulo de relés y manifold, de tal forma que si el Arduino llega a fallar, basta con apagar la regleta para apagar todas las válvulas del manifold, y por lo tanto, todas válvulas neumáticas.

Debido a que la presión dada por el tanque de hidrógeno es muy alta (13000 kPa aproximadamente), se decide mantener el regulador de presión analógico que se encuentra adaptado a

la salida de este, como se muestra en la Figura 4.31 con el fin de ingresar una presión menor en el sistema (por ejemplo, 5000 kPa). Si esto no se realiza, el control de presión podría no estabilizarse nunca por la velocidad a la que entra el fluido al sistema. Además, podría acortar la vida útil de las válvulas neumáticas por movimientos rápidos de alto impacto.



**Figura 4.31:** Regulador de flujo analógico adaptado a la salida del tanque de hidrógeno.

Por último, se decide validar que para que la correcta manipulación del sistema, los dispositivos deben estar conectados a la computadora, de tal forma que no quedan pulgas en la programación y así evitar errores en el código y manipulación de válvulas, presión y temperatura.

# Capítulo 5

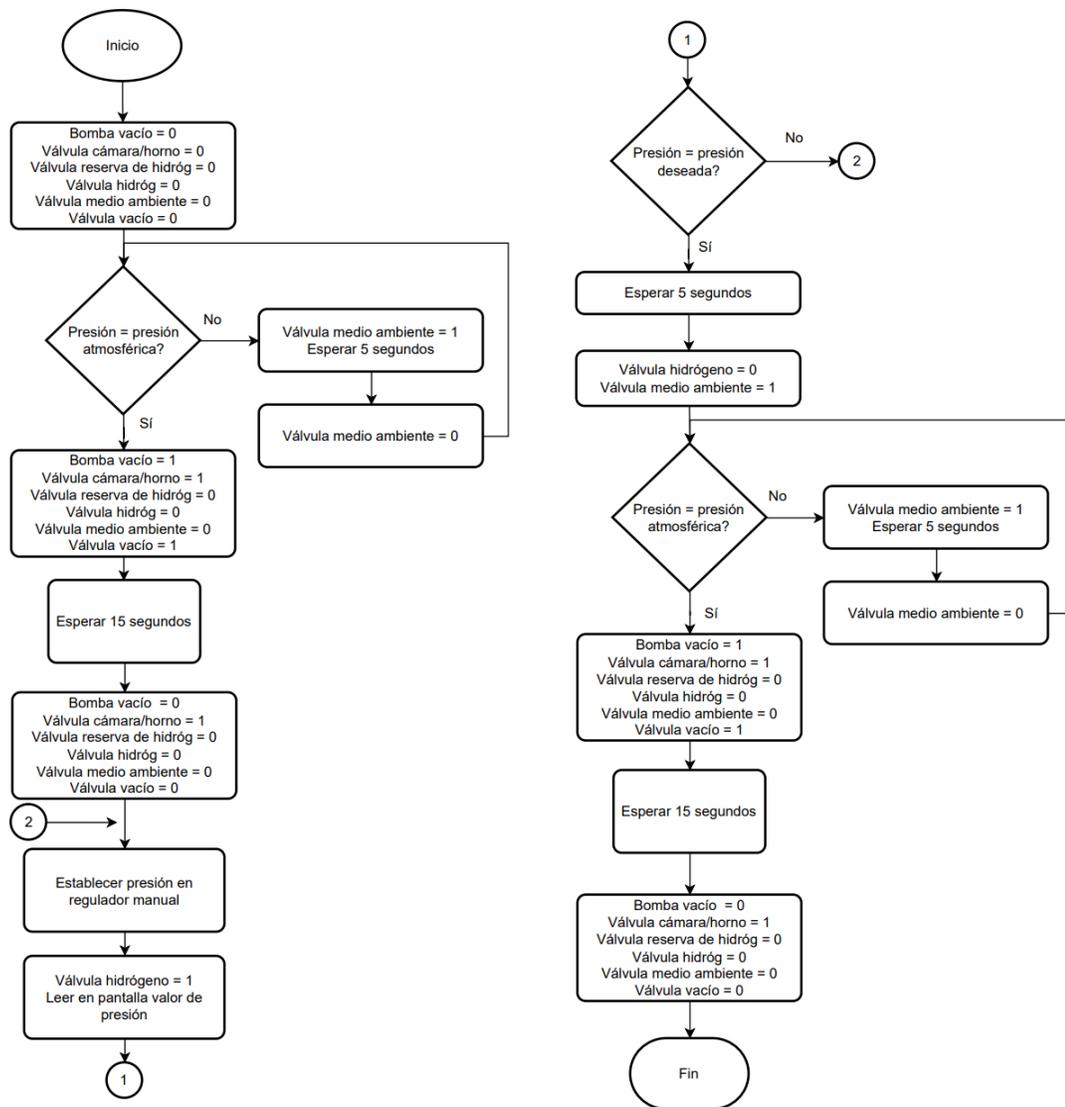
## Resultados y Análisis

Para posteriormente validar la solución, se debe considerar primero cuánto tiempo se tarda en ejecutar los procesos actualmente de forma manual. Este equipo no ha realizado pruebas, sin embargo, se cuenta con una guía de usuario para ejecutar el proceso de limpieza. Por lo tanto, debemos definir una cantidad de pruebas a realizar en el sistema.

Un enfoque teórico que puede calcular el número de pruebas es la determinación del tamaño de muestra ( $n$ ) basado en la precisión deseada (margen de error) y el nivel de confianza estadístico. Según literatura, el tamaño de muestra se calcula para que la variabilidad en las mediciones sea representativa del sistema, balanceando la necesidad de precisión con un costo de tiempo y recursos controlado [60]. Para un sistema que no ha realizado pruebas, basándose en estudios de control estadístico y en teoría de muestreo, realizar al menos 10 pruebas permite un análisis inicial razonable y otorga una estimación básica de la variabilidad del sistema [60].

También, en ingeniería, se recomienda usar al menos 10 mediciones cuando se busca un balance entre precisión y eficiencia de recursos, especialmente si no se cuenta con datos previos que indiquen una baja variabilidad [61]. Por lo tanto, realizar 10 pruebas por cada operario del sistema, representa una muestra significativa para comparar resultados con el sistema una vez automatizado.

Según lo presentado en el capítulo 4, los operarios del sistema ejecutaron la puesta en marcha del sistema, sin embargo, de forma manual. En la Figura 5.1 se ubica el diagrama de flujo del procedimiento manual realizado. Los resultados de estas 10 pruebas se pueden observar en la Tabla F.1 del apéndice F, realizadas por 2 operarios distintos.



**Figura 5.1:** Diagrama de flujo del proceso de purga del sistema realizado manualmente.

Ahora se deben definir la cantidad de pruebas a realizar en el sistema automatizado. Seleccionar una muestra más grande de lo necesario para obtener los resultados deseados en un experimento resulta en un desperdicio de recursos. Por otro lado, muestras excesivamente pequeñas suelen producir resultados de poca utilidad práctica, y es posible que no logremos alcanzar los objetivos de nuestro análisis [62].

Para determinar el tamaño adecuado de la muestra, es importante considerar tres factores:

- El nivel de confianza requerido
- La desviación estándar
- El margen de error permitido

Para este caso, la varianza es desconocida, por lo que buscaremos la cantidad de pruebas mediante la distribución t de student mostrada en la ecuación 5.1 [62][63].

$$n = \frac{t_{\alpha/2, (n_p-1)}^2 S_p^2}{e^2} \quad (5.1)$$

En la Tabla F.2 ubicada en el apéndice F se encuentran los datos unificados para el cálculo de la cantidad de pruebas a realizar al sistema automatizado, ya que se quiere reducir el tiempo independientemente del operario que trabaje con el equipo.

El nivel de confianza es 95% y el margen de error es de 18 segundos. Las ecuaciones F.1, F.2 y F.3 mostradas en este mismo apéndice corresponden al promedio muestral, la varianza y la desviación estándar respectivamente. El cálculo del valor de t se hizo con ayuda de la tabla t de student mostrada en la Figura F.1 del apéndice [64].

En la Figura F.3 se encuentran los valores calculados a partir de lo mencionado anteriormente y las tablas del apéndice. Se concluye que se deben realizar 11 pruebas al sistema para obtener datos significativos con los que comparar. Esto para la prueba de reducción de tiempo, tiempo de respuesta de las válvulas y variabilidad de resultados.

A partir de este punto, se destaca la falla del conversor A/D K-114 del sensor Keller Serie 33X, la cual se debió a la longevidad del dispositivo y su ubicación dentro de la cámara de pruebas, provocando corrosión en las partes internas del dispositivo y dañando la placa. Esto generó la necesidad de diseñar y ejecutar varios planes de acción para garantizar la funcionalidad del sistema. A continuación, se describen los planes realizados y los resultados obtenidos.

El conversor K-114 fue enviado a reparación con un técnico especializado en electrónica, quien tiene experiencia en este tipo de dispositivos. Según su análisis, el daño parecía reparable, sin embargo, tras los intentos de reparación, el conversor no respondió correctamente y fue descartado como una solución viable.

Se exploró la posibilidad de utilizar un convertidor RS485 a USB genérico. Para el correcto funcionamiento del sensor, el convertidor debía tener al menos cuatro pines (A+, A-, Vcc y GND) y proporcionar una alimentación de al menos 8 V, según las especificaciones del manual del sensor. Se probaron varias alternativas, incluyendo un convertidor RS485-USB de dos pines con alimentación externa de 12 V y un conversor RS232-RS485, pero en ninguno de los casos se obtuvo una respuesta del sensor. Este plan tampoco tuvo éxito debido a la incompatibilidad con los requerimientos específicos del sensor.

Por último, se consideró pedir un nuevo conversor K-114 directamente al fabricante, el cual cumple con las especificaciones requeridas (12 VDC de alimentación y protección contra interferencias). Sin embargo, el tiempo estimado de entrega era considerablemente largo, lo que hacía inviable esta opción dentro del plazo establecido para el proyecto. Por lo tanto, este plan también fue descartado.

Dado que ninguna de las soluciones propuestas pudo implementarse satisfactoriamente, se definió una estrategia para continuar con la validación del sistema. La solución se basó en dos enfoques paralelos:

- Validación en el sistema real: La temperatura, al ser independiente de las válvulas

y de la presión, se decide implementar físicamente y validarse en el sistema. Esto permitió verificar el correcto funcionamiento del control de temperatura, garantizando que cumpliera con los requerimientos del cliente.

- Validación mediante simulación: Se optó por simular el comportamiento de las válvulas automáticas y el control de presión utilizando datos simulados, lo que permitió evaluar la reacción del sistema frente a cambios en las variables. De esta manera, se comprobó el cumplimiento de los objetivos del cliente y se validó el desempeño del control de presión y las válvulas automáticas, aunque no se implementaron físicamente.

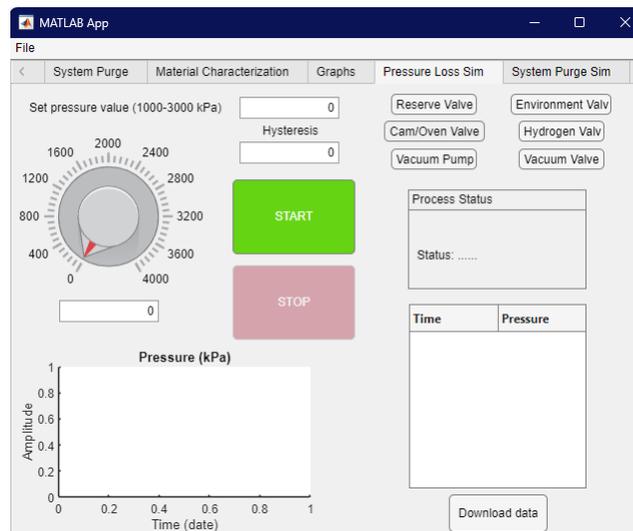
Finalmente, debido a los retrasos acumulados y en acuerdo con el cliente, se decidió no integrar las válvulas automáticas en el sistema físico, priorizando la validación del concepto mediante simulación. En las siguientes secciones, se detalla el proceso de validación, tanto en el sistema físico como en la simulación, destacando los aprendizajes y resultados obtenidos.

## 5.1 Estrategias de validación

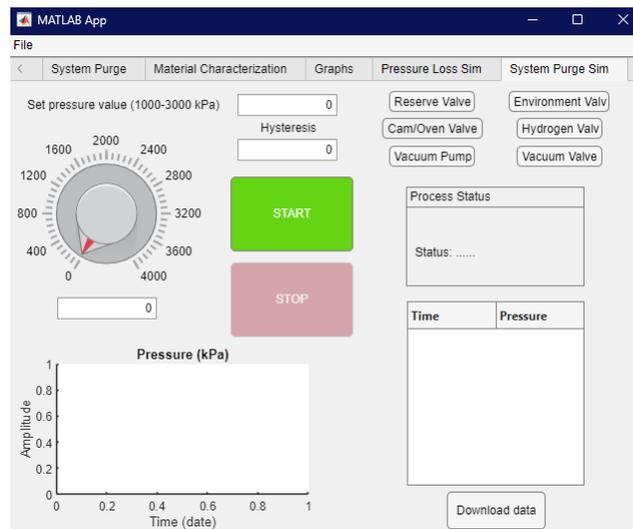
### 5.1.1 Reducción de tiempo y estado de válvulas

La reducción de tiempo en la puesta en marcha del sistema se valida ejecutando el proceso de purga del sistema (mostrado en la Figura 4.7) y estableciendo los parámetros iniciales del proceso de caracterización. Se debe tomar el tiempo desde el momento en el que el usuario inicia el proceso de purga, hasta el momento en el que escribe el último parámetro de caracterización en la pestaña de la Figura 4.9. Luego se debe comparar con los datos de la Tabla F.1 del apéndice F. El tiempo promedio medido debe ser al menos 30% menos del medido de forma manual para considerar la prueba como exitosa.

Como se mencionó con anterioridad, la falta del sensor de presión impacta en el objetivo de esta prueba, por lo que se decide simular el valor del sensor de presión. Con esto, se observa el comportamiento de las válvulas del sistema, reaccionando al proceso, especialmente en el manifold. Para esta validación, se deben realizar 11 pruebas tanto para el proceso de pérdidas de presión, el cual se ubica en la pestaña de mostrada en la Figura 5.2, como para el proceso automático del proceso de purga del sistema, ubicada en la pestaña de la Figura 5.3, ambas con la presión simulada.



**Figura 5.2:** Pestaña de prueba de pérdidas de presión con presión simulada.



**Figura 5.3:** Pestaña de purga del sistema con presión simulada.

Para el control de presión, primero se deben establecer el valor de presión que se quiere probar y el valor de histéresis, el cual fue explicado en la sección 2.3.4. Seguidamente, se debe establecer una presión simulada utilizando la perilla mostrada en la interfaz. A continuación, se debe presionar el botón de START. A partir de aquí, el sistema realiza el algoritmo explicado en la Figura 4.18 según el valor de presión que simulemos con la perilla. Se deben hacer 11 pruebas saliendo y entrando en el valor de presión solicitado, para 11 valores de presión distintos. Se debe observar tanto en la interfaz como en el manifold, la válvula correspondiente al proceso actual (ingresar hidrógeno, sacar hidrógeno o estabilizado) debe encenderse o apagarse. El estado se puede observar en el panel de proceso.

Respecto al proceso de purga del sistema, se realizan los mismos pasos iniciales hasta la selección del botón de START. A partir de este punto, se debe mover la perilla en función de lo que está sucediendo con el sistema. Este, está programado siguiendo las restricciones de

los componentes, como la bomba de vacío, mencionada con anterioridad. Se debe ejecutar el proceso 11 veces para 11 valores de presión distintos. Las válvulas deben reaccionar según en que etapa del proceso de purga se encuentre. Se puede observar la etapa en el panel de estado de proceso.

La ejecución detallada de los procesos se encuentra en el manual de usuario en el apéndice G.

### 5.1.2 Tiempo de respuesta de las válvulas y disminución de desperdicios de hidrógeno

Para validar el diseño del sistema de válvulas, se van a medir los tiempos de respuesta tanto de las electroválvulas del manifold, como los de las válvulas neumáticas. Para esto, la utilización de un osciloscopio y un sensor de flujo son fundamentales.

Estando en la pestaña de pruebas de control de válvulas, observada en la Figura 4.3, se deben tomar mediciones con el osciloscopio y el sensor de flujo, tanto para la apertura como el cierre de las válvulas. Con el osciloscopio se mide el tiempo de respuesta de las electroválvulas del manifold y con el sensor de flujo se mide el tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas. Se toman mediciones 11 veces para cada válvula, como se discutió en la sección anterior, teniendo en total 55 pruebas. La respuesta promedio de las válvulas debe ser menor a 2 segundos para considerar la prueba como exitosa.

Para medir las señales con el osciloscopio, es fundamental contar con sondas especiales que reduzcan el voltaje de la señal 110VAC. Se utilizan las mostradas en la Figura 5.4. En la sección de pruebas de respuesta de las válvulas del informe de validación, ubicado en el apéndice H, se encuentra el procedimiento detallado para la configuración del osciloscopio.



**Figura 5.4:** Sonda de prueba para osciloscopios de 60 MHz (atenuación x10).

Para medir el tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas, se utiliza el sensor de flujo observado en la Figura 5.5. Este debe estar conectado entre el manifold y la válvula neumática a medir, justo antes de esta última. El sensor permite visualizar el tiempo en el que dura la señal en estabilizarse a la presión de servicio. Se deben tomar 11 mediciones para cada una de las válvulas neumáticas. El aire a presión debe estar conectado al manifold. En la sección de pruebas de respuesta de las válvulas del informe de validación, ubicado en el apéndice H, se encuentra el procedimiento detallado para la configuración del sensor de flujo.



**Figura 5.5:** Sensor de flujo FESTO SFAH-50V-G18FS-PNLK-PNVBA-M8.

Para comprobar la disminución de desperdicios de hidrógeno, se debe ejecutar el proceso de pruebas de pérdidas de presión en el sistema, observado en la Figura 4.12. Sin embargo, por los hechos mencionados, se valida el estado de las válvulas con la prueba de pérdidas de presión de la Figura 5.2 Se deben ejecutar 11 pruebas y registrar datos de estas. La presión no debe variar más de un 10% durante el proceso para considerar la prueba como exitosa, sin embargo, para efectos de simulación, se considera el estado de las válvulas para saber si hay un desperdicio o no.

### 5.1.3 Variabilidad de resultados

Para validar la variabilidad de los resultados, se ejecutan 11 pruebas del proceso de purga del sistema, observado en la Figura 4.7, se registran datos de presión, temperatura y tiempo, se calcula la desviación estándar de estos y se analiza. La variabilidad de estos datos no debe ser mayor a 10% para considerar la prueba como exitosa.

Debido a lo mencionado anteriormente, al no contar con un sensor de presión, no se toman en cuenta la variabilidad de esta, por lo que se decide validar la variabilidad de los datos mediante el control de temperatura. Para esto, se ejecuta la prueba de control de temperatura mostrada en la Figura 4.4 y se guardan los datos de temperatura y tiempo. El proceso detallado de la prueba de control de temperatura se encuentra en la sección de prueba de temperatura para validación de variabilidad de resultados del informe de validación en el

apéndice H.

## 5.2 Resultados de validación

### 5.2.1 Reducción de tiempo

Siguiendo el procedimiento de la sección 5.1.1, el cual hace referencia a las secciones de Pressure Loss Sim y System Purge Sim del manual de usuario del apéndice G, se observan los resultados obtenidos en las Tablas 5.1 y 5.2.

Se ejecutaron pruebas en las que se consideraron diferentes puntos iniciales de presión en el sistema, valores objetivo y valores de histéresis.

En las Figuras 101-111 de la sección de pruebas de validación de respuesta del manifold ante simulación de presión del informe de validación en el apéndice H, se observa el comportamiento del sistema ante la prueba de pérdidas de presión con presión simulada. El valor de presión fue simulado en función de la activación/desactivación de las válvulas para comprobar la correcta programación y respuesta de estas. En la Figura 111 se corroboró la correcta deshabilitación de las válvulas una vez el sistema esté estable, simulando pérdidas de presión en este. En todas las pruebas se observa en la curva un periodo de estabilización, el cual oscila entre los valores de histéresis. Se observa en la Tabla 5.1 que en todas las pruebas realizadas, las válvulas respondieron de la forma esperada.

En las Figuras 112-122 de la sección de pruebas de validación de respuesta del manifold ante simulación de presión del informe de validación en el apéndice H, se observa el comportamiento del sistema ante la prueba de purga del sistema con presión simulada. El valor de presión fue simulado en función de la activación/desactivación de las válvulas para comprobar la correcta programación y respuesta de estas. En todas las pruebas se observa en la curva un periodo de estabilización cuando se ingresa la presión deseada al sistema, el cual oscila entre los valores de histéresis. Además, el primer paso del proceso es hacer un vacío en el sistema, por lo que se observa en pruebas como la 2, 4, 6, entre otras, como el programa lleva al sistema primeramente a la presión atmosférica antes de ejecutar el vacío, con el fin de no dañar la bomba de vacío, la cual es limitada, como se mencionó en secciones anteriores. Se observa en la Tabla 5.2 que en todas las pruebas realizadas, las válvulas respondieron de la forma esperada.

Luego de analizar los resultados, se concluye que el sistema responde correctamente ante los estímulos de presión en todas las pruebas, por lo que en una prueba real con el sensor de presión habilitado, las válvulas reaccionarán ante las señales de este. Se concluye la prueba como exitosa.

**Tabla 5.1:** Estado de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de pérdidas de presión con el sensor de presión simulado.

# de prueba	Métrica	Environment	Hydrogen
1	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
2	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
3	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
4	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
5	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
6	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
7	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
8	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
9	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
10	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
11	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0

**Tabla 5.2:** Estado de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de purga del sistema con el sensor de presión simulado.

# de prueba	Métrica	Environment	Hydrogen	Vacuum
1	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
2	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
3	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
4	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
5	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
6	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
7	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
8	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
9	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
10	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
11	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1

## 5.2.2 Tiempo de respuesta de las válvulas y disminución de desperdicios de hidrógeno

Los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento de la sección para la validación del tiempo de respuesta de las válvulas se observa en el apéndice H, también mencionado en la sección 5.1.2.

En la sección de pruebas de tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas del respectivo apéndice, se encuentra el procedimiento realizado para la prueba de tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas utilizando la función ST del sensor de flujo de la Figura 5.5. En la Tabla 5.3 se encuentran los resultados obtenidos para las pruebas realizadas a cada válvula. Mediante el sonido que hace la válvula neumática, es fácil identificar si esta se abre o se cierra. El tiempo de respuesta promedio de las válvulas neumáticas es de 370.79 ms.

**Tabla 5.3:** Tiempos de respuesta de las válvulas neumáticas.

Número de prueba	Cámara/Horno (ms)	Medio Ambiente (ms)	Hidrógeno (ms)	Reserva (ms)	Vacío (ms)
1	326.65	401.95	321.65	412.44	379.99
2	354.21	367.77	365.48	500.65	402.12
3	330.96	395.26	398.41	350.60	412.26
4	312.14	358.96	357.95	360.36	395.96
5	369.20	345.45	347.32	359.13	388.41
6	420.69	322.89	345.61	395.31	421.57
7	399.64	366.11	378.91	366.22	439.75
8	367.28	374.25	309.04	354.20	353.62
9	359.32	326.74	318.06	343.43	457.56
10	375.14	333.59	397.88	365.27	426.61
11	382.33	317.55	336.94	323.32	399.11
<b>Tiempo de respuesta promedio por válvula (ms)</b>	363.41	355.50	352.48	375.54	407.00
<b>Tiempo de respuesta promedio de las válvulas (ms)</b>	370.79				

Entre las Figuras 40-94 del apéndice H se encuentra una serie de imágenes correspondientes a la toma de mediciones con el osciloscopio. Se obtuvieron resultados variando el ms/div con el fin de observar la respuesta de diferentes formas. Se observa en cada imagen la escala utilizada. Por limpieza de la imagen, se desactivaron los cursores a la hora de la captura, sin embargo, en la Tabla 5.4 se encuentran los datos recopilados y en la Figura 98 del apéndice se presenta una imagen donde se observan los cursores mencionados.

Se tomaron mediciones para el encendido y apagado de las válvulas, como se observa en las Figuras 48 (apagado), 50 (apagado), 47 (encendido) y 51 (encendido). Además, en las Figuras 95 y 96 del apéndice, se muestran las señales para cuando la válvula está encendida y apagada respectivamente. Se observa que para mantener la válvula apagada, el Arduino debe enviar un 1 lógico de 5 V y para mantenerla encendida debe enviar un 0 lógico o 0 V. Esto se debe a la lógica inversa que maneja el módulo de relés de 8 canales utilizado, por lo tanto, las ondas observadas tienen un comportamiento esperado.

Utilizando los cursores, se determinaron los tiempos de respuesta de cada electroválvula, los cuales nos permiten obtener la diferencia de tiempo entre la señal de control (activación) y la señal de la electroválvula (respuesta). El tiempo de respuesta promedio de las electroválvulas es de 4.55 ms.

**Tabla 5.4:** Tiempos de respuesta de las electroválvulas del manifold.

Número de prueba	Cámara/Horno (ms)	Medio Ambiente (ms)	Hidrógeno (ms)	Reserva (ms)	Vacío (ms)
1	4.32	4.16	3.94	4.98	3.79
2	4.73	4.22	4.66	4.82	4.02
3	4.56	4.39	4.07	5.65	4.12
4	4.62	4.61	4.54	5.62	3.95
5	4.44	5.02	4.15	3.93	3.88
6	4.39	4.29	7.09	4.04	4.21
7	4.55	4.96	3.89	4.20	4.39
8	4.92	3.99	4.52	3.76	3.53
9	5.65	4.10	5.18	4.69	4.57
10	5.26	5.06	6.14	3.55	4.26
11	5.37	6.06	4.77	3.88	3.99
<b>Tiempo de respuesta promedio por electroválvula (ms)</b>	4.80	4.62	4.81	4.47	4.06
<b>Tiempo de respuesta promedio de las electroválvulas (ms)</b>	4.55				

En Tabla 5.5 se encuentra la suma de los tiempos promedio de respuesta de las válvulas neumáticas y las electroválvulas. Se observa que el tiempo promedio de respuesta de las válvulas del sistema desde el momento en el que activa la señal en la interfaz hasta la apertura de la válvula neumática es de 375.34 ms, concluyendo así la prueba como exitosa y cumpliendo con el requisito del cliente.

**Tabla 5.5:** Tiempos de respuesta de las válvulas del sistema.

<b>Tiempo de respuesta promedio de las electroválvulas (ms)</b>	4.55
<b>Tiempo de respuesta promedio de las válvulas (ms)</b>	370.79
<b>Tiempo total promedio de respuesta de las válvulas (ms)</b>	375.34

La disminución de desperdicios de hidrógeno debido a errores humanos se comprueba mediante los estados vistos en la Tabla 5.1 en el apartado anterior. Los resultados de las pruebas son favorables, por lo que se concluye la validación como exitosa.

### 5.2.3 Variabilidad de resultados

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.1.3, se registraron los datos de las 11 pruebas. Se pueden consultar los resultados en las Figuras 1-34 del informe de validación del proyecto en el apéndice H.

El comportamiento de la temperatura en la cámara es casi el mismo en todas las pruebas realizadas. La temperatura va subiendo progresivamente hasta llegar al valor de 35 °C. Las pruebas se realizaron con este valor objetivo por necesidad del cliente. Observando los datos obtenidos y la variabilidad obtenida, se concluye que el control de temperatura en la cámara es estable.

El comportamiento del control de temperatura es similar para todas las pruebas en el controlador del horno. La temperatura incrementa relativamente rápido respecto a la cámara, luego se pasa del valor objetivo y disminuye hasta estabilizar. Se observa el comportamiento típico del regulador PID, como se menciona en la sección 2.3.3 del capítulo teórico, configurado el procedimiento mencionado en la sección de Temperature Control del manual de usuario ubicado en el apéndice G,

Analizando los resultados, se concluye que 1 hora es suficiente para que la temperatura en la cámara y el horno se estén estables. Por lo tanto, para calcular la variabilidad de los resultados, se analizarán los datos que estén después de esta hora, en la sección estable.

En la Tabla 5.6 se encuentran los cálculos del coeficiente de variación (variabilidad) de los datos obtenidos en cada prueba. Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, se encuentran en la sección de variabilidad de resultados del informe de validación del proyecto ubicado en el apéndice H.

**Tabla 5.6:** Variabilidad de resultados en control de temperatura.

Número de prueba	Métrica	Media	Desviación Estándar	Coficiente de variación
1	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150.0005	2.13%	1.42%
2	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	149.9996	2.07%	1.38%
3	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
4	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
5	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
6	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
7	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.71%	0.47%
8	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
9	Temperatura en cámara	34.9999	0.71%	2.03%
	Temperatura en horno	150	0.50%	0.33%
10	Temperatura en cámara	34.9999	1.00%	2.86%
	Temperatura en horno	150	0.50%	0.33%
11	Temperatura en cámara	35	0.50%	1.43%
	Temperatura en horno	149.9996	2.01%	1.34%

En la Tabla 5.7 se muestra el cálculo de la variabilidad del sistema en cuanto al control de temperatura. La variabilidad total de los datos de temperatura es de 0.53%, por lo que se concluye la prueba como exitosa.

**Tabla 5.7:** Variabilidad de resultados.

Número de prueba	Coeficiente de variación promedio por controlador	
	Cámara	Horno
1	0.00%	1.42%
2	0.00%	1.38%
3	0.00%	0.00%
4	0.00%	0.00%
5	0.00%	0.00%
6	0.00%	0.00%
7	0.00%	0.47%
8	0.00%	0.00%
9	2.03%	0.33%
10	2.86%	0.33%
11	1.43%	1.34%
<b>Promedio</b>		
	0.57%	0.48%
<b>Promedio total</b>		
	0.53%	

### 5.3 Análisis económico

En esta sección se busca realizar un análisis de los recursos generados e invertidos durante la realización de este proyecto. Debido a que es un proyecto de investigación y no tiene como objetivo generar ingresos económicos, la comparación no se enfoca únicamente en los recursos monetarios generados.

Inicialmente, se establecen los recursos invertidos que se listan en las tablas 5.8 y 5.9. Sumando el total de estas tablas, el CIEMTEC invirtió un total de  $\$7,280,995.2$  en la creación del equipo PCT manual. En estas tablas se incluyen tuberías, láminas que conforman la cámara, el horno, controladores de temperatura, tanques de hidrógeno, tanques de reserva de aluminio y todos los componentes que conforman el sistema previo a la automatización de este.

Además, en la Tabla 5.10 se observan los componentes adquiridos por el CIEMTEC previo a la realización del proyecto. Como se ha mencionado con anterioridad, estos son de uso obligatorio durante la ejecución del proyecto. El costo total de estos componentes es de  $\$1,397,522.5$ , que incluye el manifold, las válvulas neumáticas y la manguera de conexión.

Tabla 5.8: Componentes del equipo manual parte 1.

Descripción	Cantidad	Precio (dólares)	Precio (colones)
JUEGO FÉRULAS INOX., 1/4" OD SWAGELOK	5.0	40.35	22,192.5
Juego férulas inox., 1/4" od Swagelok	2.0	18.64	10,252.0
JUEGO FÉRULAS INOX., 1/4pulg OD SWAGELOK	5.0	41.16	22,638.0
MANGUITO VCR SOLDABLE INOX SWAGELOK 1/2 VCR X 1/2". ENCASTRE DE TUBO, # PARTE SS-8-V CR-3	2.0	52.64	28,952.0
Manguito ciego VCR de Acero inox. 316, 1/4 pulg	1.0	48.63	26,746.5
KIT DE SOPORTE PARA TUBING DE 1/4", SWAGELOK	6.0	56.78	31,229.0
26291 Cortadora de tubo / Tube Cutter for Stainless Steel, Soft Copper, and Aluminum Tubing from 3/16 to 1 in. OD	1.0	117.68	64,724.0
TUBING INOX S/COSTURA 1/4 OD X 0.035" PARED 6MTS # PARTE SS-T4-S-035-6ME	1.0	84.05	46,227.5
26292 Tube Cutter Replacement Cutting Wheel	1.0	22.82	12,551.0
19366 Hand Tube Bender, 1/4 in. Tube OD, 3/4 in. Bend Radius	1.0	438.24	241,032.0
TAPÓN PARA RACOR INOX. 316, 1/4" OD SWAGELOK	1.0	23.23	12,776.5
TAPÓN HEMBRA VCR DE ACERO INOX. 316, 1/4 PULG.	1.0	54.33	29,881.5
TAPÓN HEMBRA PARA RACOR INOX. 316, 1/4" OD SWAGELOK	2.0	32.52	17,886.0
TAPÓN MACHO INOX., 1/4" NPT MACHO, SWAGELOK	1.0	15.03	8,266.5
TAPÓN PARA RACOR INOX. 316, 1/4pulg OD SWAGELOK	1.0	23.69	13,029.5
TAPÓN HEMBRA VCR DE ACERO INOX. 316, 1/4 PULG.	1.0	55.42	30,481.0
24476 TUERCA HEMBRA VCR INOX 1/4 FNPT SWAGELOK, @ PARTE SS-4-VCR-1	2.0	20.90	11,495.0
Tuerca macho VCR de Acero inox. 316, 1/4 pulg	1.0	32.08	17,644.0
21879 UNION TEE INOX SWAGELOK 1/4 OD TUBO, # PARTE SS-400-3	3.0	129.06	70,983.0
21896 UNION CRUZ INOX SWAGELOK, 1/4 OD, # PARTE SS-400-4	1.0	78.03	42,916.5
UNIÓN REDUCTORA INOX., 3/8pulg X 1/4pulg OD SWAGELOK	2.0	148.35	81,592.5
21896 UNION CRUZ INOX SWAGELOK, 1/4 OD, # PARTE SS-400-4	1.0	90.99	50,044.5
22894 VCR Face Seal Fitting, 1/4 in. Rotating Female Union	1.0	140.04	77,022.0
24510 Double Male Reducing Union Body, 1/2 in. VCR x 1/4 in. VCR	1.0	68.47	37,658.5
24528 Welded VCR Face Seal Fitting, 1/2 in. Rotating Female Union	1.0	188.79	103,834.5
24521 VCR Face Seal Fitting, 1/2 in. Plug	1.0	34.66	19,063.0
UNION TEE INOX SWAGELOK 1/4 OD TUBO, # PARTE SS-400-3	1.0	43.02	23,661.0
UNION CRUZ INOX SWAGELOK, 1/4 OD, # PARTE SS-400-4	1.0	78.03	42,916.5
316L STAINLESS STEEL 90° TUBE BUTT WELD UNION ELBOW 1/4 OD.PART 316L-4TB7-9	2.0	154.00	84,700.0
20742 VALVULA DE AGUJA INOX CON BONETE INTEGRAL Y OBTURADOR NO GIRATORIO 1/4 OD SWAGELOK # PARTE SS-14-DKS4	2.0	355.74	195,657.0
22625 VALVULA BOLA INOX NSWAGELOK, 1/4 VUELTA, 1/4 OD 1000PSI # PARTE SS-4P4T	4.0	445.40	244,970.0
Total invertido en equipo manual parte 1		3,132.77	1,723,023.50

Tabla 5.9: Componentes del equipo manual parte 2.

Descripción	Cantidad	Precio (dólares)	Precio (colones)
24837 VALVULA DE DIAFRAGMA ALTA PRESION INOX 1/4 pulg RACOR SWAGELOK VCR MACHO MANDO PALANCA SWAGELOK, # PARTE SS-DLVCR4	2.0	757.75	416,762.5
Válvula de bola de 1 pieza serie 40G de acero inox.	1.0	494.37	271,903.5
22081 Válvula paso VCR / Stainless Steel 1-Piece 40G Series Ball Valve, 2.4 Cv, 1/4 in. Male Swagelok VCR Metal Gasket Face Seal Fitting	1.0	274.64	151,052.0
CONECTOR HEMBRA INOX 1/4 OD X 3/8 HEMBRA ISO PARALELA SWAGELOK, # PARTE SS-400-7-6RJ	2.0	68.04	37,422.0
Conector hembra Swagelok de Acero inox., 1/4 pulg OD x 1/4 pulg. hembra	1.0	60.32	33,176.0
CONECTOR MACHO INOX 1/4 OD X 1/4 NPT SWAGELOK # PARTE SS-400-1-4	5.0	176.82	97,251.0
Regulador de presión para gas hidrógeno. Completamente en acero inoxidable 316. Conector CGA para cilindro. Presión entrada máx. 4000 PSI (28000 kpa) y rango de salida 0-2000 PSI (14000 kpa). Incluye manómetros. Conexión de salida 1/4 OD. Marca Swagelok	1.0	1,458.09	801,949.5
3030 & 3040 Series High Delivery Pressure Regulator - Brass, Inlet connection: 350 CGA, Delivery pressure: 100 to 2500 psig	1.0	608.50	334,675.0
REGULADOR DE PRESIÓN-LATÓN (Pressure Regulator - Brass): 3030 & 3040 Series High Delivery, Part Number: SEQ3040350, Inlet connection: 350 CGA, Delivery pressure: 100 to 2500 psig.	1.0	1,542.85	848,567.5
22620 Stainless Steel Pipe Fitting, Pipe Plug, 1/4 in. Male NPT	1.0	11.93	6,561.5
21971 316 Stainless Steel Nut for 1/4 in. Swagelok Tube Fitting	1.0	4.30	2,365.0
27972 1000 CC 316L Stainless Steel Double Ended DOT-Compliant Sample Cylinder, 1/4 in. FNPT, 1000 cm <sup>3</sup> , 1800 psig (124 bar)	1.0	1,436.69	790,179.5
22438 50 CC / 316 Stainless Steel Single Ended Miniature Sample Cylinder, 50 cm <sup>3</sup> , 1000 psig (68.9 bar)	1.0	318.76	175,318.0
16411 CILINDRO TOMA MUESTRA INOX 316L, 2 CONEXIONES 1/4 FNPT HEMBRA, 500 cm <sup>3</sup> , 1800 PSI SWAGELOK # PARTE 316-HDF4-500	2.0	661.13	363,621.5
ADAPTADOR SOLDADO VCR A RACOR INOX SWAGELOK 1/4 WVCR X 1/4 pulg SWAGELOK, # PARTE SS-4-WVCR-6-400	2.0	151.24	83,182.0
JUNTA PLANA VCR INOX 316, 1/4 pulgada, RECUBIERTA DE PLATA Y CON FILTRO, SIN RETENEDOR, 2 MICRONES SWAGELOK, @ PARTE SS-4-VCR-2-2M	4.0	56.76	31,218.0
GALGA INSPECCION 1/4 IN., 3/8 IN. 1/2 IN. SWAGELOK	1.0	31.63	17,396.5
BOMBA VACIO 7 CFM 115V 60 HZ VE160 YONCHI	1.0		142,250.0
RESISTENCIA, CERAMIC FIBER HEATER WATLOW 120V 450W 2" DIA X 6" LARGO. COD. VC402A06A-0000R PAA-33X / 100bar. Número de producto: 233305.4806. Rango de presión: 0...100bar abs. Señal de salida: 0...5V. RS485. Conexión de presión: G1/4. Conector eléctrico: Binder 723 / 5-p. Error total [%FS] analógico: 0.15. Error total [%FS] digital: 0.1. Rango de calibración. (FS) [bar]: 100. Alimentación: 8...32V. Temperatura compensada: -10...80°C.	1.0	502.00	276,100.0
Convertidor A/D RS485-USB K-114-B	1.0	155.00	85,250.0
HIDROGENO UAP	2.0	598.77	311,360.7
Total invertido en equipo manual parte 2		9,369.59	5,557,971.70

**Tabla 5.10:** Componentes adquiridos para la automatización previo al proyecto.

Componentes adquiridos para la automatización previo al proyecto			
Componente	Cantidad	Precio (dólares)	Precio (colones)
6 METROS MANG PFA 1/4pulgOD 0.047 PARED SWAGELOK	6 metros	265.20	145,860.0
22051 Valvula paso / Stainless Steel 1-Piece 40G Series Ball Valve, 1.4 Cv, 1/4 in. Swagelok Tube Fitting	5 unidades	1,000.75	550,412.5
Manifold de 5 electroválvulas 1/4, 110 V	1 unidad	1,275.00	701,250.0
Total		2,540.95	1,397,522.5

La compra de componentes mecánicos representa un gasto de ¢13,963.6. Todos estos componentes se pueden observar en la Tabla 5.11 y son los utilizados en el sistema de control de las válvulas.

**Tabla 5.11:** Componentes mecánicos adquiridos para la automatización durante el proyecto.

Componentes mecánicos adquiridos para la automatización durante el proyecto			
Componente	Cantidad	Precio (dólares)	Precio (colones)
Acrílico para carcasa negro	1 lámina	9.62	5,000.0
Acrílico para carcasa verde	1 lámina	9.62	5,000.0
Tornillo M3	12 unidades	1.03	534.1
Arandela M3	52 unidades	1.25	650.0
Tuerca M3	12 unidades	0.76	395.5
Tornillo M4	4 unidades	0.57	295.9
Arandela M4	16 unidades	0.45	232.3
Tuerca M4	4 unidades	0.15	76.0
Hule protector	1 paq	1.63	847.5
Gaza plastica	1 paq	1.79	932.3
Total		26.85	13,963.6

La compra de los componentes electrónicos representa un gasto de ¢52,953.2. Todos estos componentes se pueden observar en la Tabla 5.12 y son los utilizados en el sistema de control de las válvulas.

**Tabla 5.12:** Componentes eléctricos/electrónicos adquiridos para la automatización durante el proyecto.

<b>Componentes eléctricos/electrónicos adquiridos para la automatización durante el proyecto</b>			
<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio (dólares)</b>	<b>Precio (colones)</b>
Cable negro AW22	1 metro	0.38	196.8
Cable blanco AW22	1 metro	0.38	196.8
Cable negro AW16	1 metro	0.80	417.5
Cable rojo AW16	3 metros	2.41	1,252.5
Cable verde AW16	3 metros	2.41	1,252.5
Cable Azul AW16	10 metros	8.03	4,175.1
Cable rojo AW20	10 metros	4.43	2,305.2
jumper macho hembra	1 paq	2.29	1,191.3
jumper macho macho	1 paq	2.29	1,191.2
pin plastico	1 paq	0.59	306.9
terminal macho	1 paq	0.98	511.5
terminal hembra	1 paq	0.98	511.5
bloque terminal	4 unidades	1.97	1,026.9
placa perforada	1 unidad	1.49	775.5
Arduino UNO	1 unidad	25.96	13,500.0
Adaptador 12V2A	1 unidad	13.36	6,949.3
Adaptador 5V1A	1 unidad	8.80	4,578.1
Modulo relays	1 unidad	14.54	7,559.0
Enchufe EAGLE	1 unidad	2.98	1,550.0
Screw terminal barrier (12 pines)	1 unidad	1.87	973.3
Cable arduino	1 unidad	4.87	2,532.1
Total		101.83	52,953.2

En la Tabla 5.13 se observa el total gastado durante el desarrollo del proyecto, el cual fue de ¢66,916.9, cumpliendo así la necesidad del cliente sobre desarrollar una solución dentro del presupuesto del CIEMTEC.

**Tabla 5.13:** Componentes adquiridos para la automatización durante el proyecto (Total).

<b>Componentes adquiridos para la automatización durante el proyecto (Total)</b>		
<b>Componente</b>	<b>Precio (dólares)</b>	<b>Precio (colones)</b>
Mecánicos	26.85	13,963.6
Eléctricos/Electrónicos	101.83	52,953.2
Total	128.69	66,916.9

En la Tabla 5.14 se puede observar el total invertido por el CIEMTEC en la automatización del equipo PCT tomando en cuenta lo adquirido con anterioridad por el centro de investigación.

**Tabla 5.14:** Gasto total en automatización.

<b>Gasto total en automatización</b>		
<b>Componentes adquiridos</b>	<b>Precio (dólares)</b>	<b>Precio (colones)</b>
Previo	2,540.95	1,397,522.5
Durante	128.69	66,916.9
Total	2,669.64	1,464,439.4

Además, el costo total del equipo es de  $\text{¢}8,745,434.6$  y se puede observar su desglose en la Tabla 5.15. Comparando con los dispositivos observados en la sección 2.1.5 del Capítulo 2, se observa que se genera un dispositivo mucho más económico, sin embargo, se debe tomar en cuenta que los dispositivos del mercado son mucho más sofisticados y pueden realizar múltiples procesos en comparación al equipo del laboratorio.

**Tabla 5.15:** Costo total del equipo.

<b>Costo total del equipo</b>		
<b>Componente</b>	<b>Precio (dólares)</b>	<b>Precio (colones)</b>
Equipo manual	12,502.36	7,280,995.2
Automatización	2,669.64	1,464,439.4
Total	15,172.00	8,745,434.6

El tiempo de ingeniería invertido es de aproximadamente 320 horas (20 horas semanales durante 16 semanas). Según el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, para un ingeniero licenciado universitario con el mismo puesto representa, el salario es  $\text{¢}765.985,67$  por mes para tiempo completo [65], por lo que se considera medio tiempo según las horas semanales mencionadas. Por lo tanto, el gasto en tiempo de ingeniería es de  $\text{¢}1.531.971,34$ . Este proyecto no es remunerado, por lo que realmente no representó un gasto para el CIEMTEC.

Adicionalmente, se toma en cuenta para posibles imprevistos un presupuesto de  $\text{¢}120.000$ , monto otorgado por el cliente. Fue utilizado para la obtención del conversor A/D que tuvo que ser reemplazado. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, este no se obtuvo a tiempo.

En la Tabla 5.16 se muestra el desglose de la inversión total del proyecto, incluyendo el coste de cada uno de los conceptos considerados, el cual es de aproximadamente  $\text{¢}1.718.888,21$ .

**Tabla 5.16:** Inversión del proyecto.

Concepto	Valor (colones)
Componentes de automatización	66,916.87
Tiempo de ingeniería	1,531,971.34
Imprevistos	120,000.00
Total	1,718,888.21

En contraste, los recursos generados son los siguientes:

- Reporte con el diagnóstico del sistema actual: Se elaboró un informe técnico detallado que documenta el estado inicial del sistema, identificando problemas críticos y áreas de mejora. Este reporte sirve como referencia histórica y técnica para futuras actualizaciones y análisis comparativos del desempeño del equipo tras su automatización.
- Obtención de información crítica para la caracterización de materiales: El sistema automatizado desarrollado permite la recopilación precisa y consistente de datos sobre la absorción y desorción de hidrógeno en materiales, utilizando variables como presión, temperatura y tiempo. Estos datos son esenciales para estudios avanzados que buscan optimizar materiales para aplicaciones energéticas.
- Automatización de procesos clave: El sistema diseñado permite ejecutar procesos fundamentales como purga, estabilización de temperaturas, control de presión y manipulación de válvulas de forma automática, mejorando la precisión y reduciendo significativamente el margen de error humano.
- Mejoras en la seguridad del sistema: La automatización reduce la manipulación manual de válvulas y equipos en presencia de hidrógeno, un gas inflamable, minimizando el riesgo de accidentes y asegurando un entorno de trabajo más seguro para los operarios.
- Incremento de la visibilidad del CIEMTEC: Este proyecto otorga al centro un mayor reconocimiento en el ámbito académico e industrial, no solo por las publicaciones científicas que se derivarán del mismo, sino también por la implementación de un sistema que mejora las capacidades operativas del laboratorio. Esto posiciona al CIEMTEC como un referente en investigación avanzada y tecnología aplicada.
- Documentación exhaustiva del sistema automatizado: Se generó una completa colección de documentos que incluye el diseño lógico del sistema, diagramas de flujo, código fuente del software, esquemas eléctricos, diseño de interfaz gráfica y pruebas de validación. Estos documentos no solo respaldan el proyecto actual, sino que también servirán como base para futuros desarrollos e implementaciones.
- Optimización de recursos: El nuevo sistema automatizado permite al personal del CIEMTEC redistribuir sus esfuerzos hacia tareas críticas de investigación, disminuyendo la carga operativa en el monitoreo manual del sistema y maximizando el uso del equipo disponible.

- Diseño e implementación de mejoras mecánicas: Se introdujeron modificaciones en el diseño físico del sistema, como la integración de una carcasa optimizada para los componentes electrónicos. Estas mejoras garantizan una mayor eficiencia del sistema.
- Validación y análisis del desempeño: Se desarrollaron y ejecutaron pruebas de validación exhaustivas para garantizar que el sistema cumple con los objetivos planteados, documentando los resultados en informes que aseguran la trazabilidad y confiabilidad del proceso.

Como se observa, a pesar de que la inversión para el desarrollo de este proyecto es relativamente alta, cerca de \$15.000.000, se generan múltiples recursos al centro de investigación, a pesar de que no se puede calcular el retorno de inversión de manera monetaria, puesto que los recursos generados no pueden medirse en colones. Sin embargo, el cliente se encuentra realmente satisfecho con los resultados obtenidos.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos a futuro

En este capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones finales del proyecto. En las conclusiones se busca evidenciar el cumplimiento de los objetivos del proyecto y la satisfacción de las necesidades del cliente. Con las recomendaciones se busca mencionar y explicar los próximos pasos para el proyecto y aplicaciones del mismo, así como aprendizajes útiles para futuros trabajos. Además, se incluyen conclusiones generadas a partir de metodología, las validaciones y el análisis económico.

El desarrollo del sistema automatizado para la caracterización de niveles de hidrógeno en materiales para el CIEMTEC ha logrado cumplir con los objetivos planteados (a excepción de la reducción del tiempo de puesta en marcha del sistema por las situaciones comentadas en el capítulo 5) en la sección 5.1.1, brindando una solución tecnológica innovadora que mejora significativamente los procesos de investigación y caracterización.

### 6.1 Conclusiones

Los objetivos se muestran en la sección 1.5. El primer objetivo consistió en evaluar el proceso actual de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales. Se puede observar el diagnóstico del sistema previo a la realización del proyecto en el apéndice C.

El sistema previo a la automatización depende de un control manual para la regulación de presión y temperatura, lo que genera una mayor posibilidad de errores humanos y falta de precisión en las operaciones, especialmente durante procesos críticos como la purga y el control de presión. Del mismo modo, la dependencia de válvulas manuales y un manómetro analógico introduce ineficiencias operativas y riesgos de inexactitud, dado que el manómetro presenta errores significativos de precisión en comparación con los estándares necesarios para la caracterización de materiales.

Asimismo, la configuración manual de los controladores de temperatura, aunque funcional, incrementa el tiempo necesario para la preparación del sistema. Además, el sistema carecía de automatización en etapas críticas como el control de vacío y la regulación del hidrógeno, lo que puede representar riesgos operativos significativos, incluidos daños en la bomba de

vacío y pérdida de hidrógeno.

Existieron riesgos de fugas de presión y problemas de compatibilidad en ciertas conexiones, como la manguera utilizada entre la válvula de hidrógeno y el regulador de presión manual, que se resolvieron utilizando materiales más adecuados como acero inoxidable.

Además, la automatización del encendido y apagado de la bomba de vacío reduciría el desgaste del equipo y el riesgo asociado a un mal uso. La implementación de alarmas y notificaciones para situaciones de alta presión o temperatura incrementaría la seguridad y la capacidad de respuesta de los operadores. Un diagrama intuitivo en la interfaz permitiría mejorar la experiencia del usuario, facilitando la comprensión del estado del sistema.

El segundo objetivo consistió en diseñar un sistema automatizado de apertura y cierre de válvulas para la caracterización de niveles de hidrógeno en materiales. Para este objetivo se definen tanto un entregable como indicador. El entregable es la documentación del diseño del sistema automatizado, incluyendo los planos del apéndice E. El indicador es la reducción de al menos un 30% del tiempo de puesta en marcha del proceso actual, el cual, como se explicó en la introducción del presente capítulo, no se validó y en su lugar se validó la respuesta de las válvulas ante estímulos simulados de presión. Según lo comentado en el capítulo 5 en la sección 5.2.1, las válvulas del sistema reaccionan de acuerdo a lo esperado, por lo que se valida el comportamiento de las válvulas.

El tercer objetivo consistió en desarrollar un software de control y recolección de datos para el sistema automatizado. El entregable es el software de control, incluyendo la interfaz gráfica de usuario, el código fuente y diagramas de flujo. El código implementado se puede observar en el apéndice D, el cual se encuentra debidamente comentado para su fácil entendimiento. El indicador para validar este objetivo es 10% máximo de variabilidad de los datos recolectados en las pruebas del sistema para cada variable crítica (presión y temperatura). Mediante la correcta manipulación de datos, lo comentado en la sección 5.2.3 y lo visto en el informe de validación del apéndice H, se concluye el cumplimiento de este objetivo.

Además, el diseño del sistema permite su personalización y expansión futura para incluir nuevas funcionalidades o adaptarse a diferentes tipos de pruebas, garantizando su relevancia a largo plazo.

El cuarto y último objetivo consistió en validar el sistema automatizado y el software de control. El entregable es el informe de validación que detalle los resultados de las pruebas realizadas y las conclusiones. Este informe se puede observar en el apéndice H. Los indicadores de validación del objetivo son que el tiempo de respuesta promedio de las válvulas del sistema automatizado debe ser inferior a 2 segundos y disminución del 95% desperdicios de hidrógeno debido a errores humanos. Según lo comentado en la sección 5.2.2, se valida el indicador del tiempo de respuesta de las válvulas y se justifica una disminución del 100% de hidrógeno debido a errores humanos, gracias a la automatización de la manipulación de las válvulas.

La integración de sistemas automatizados para el control de presión, temperatura y válvulas ha demostrado ser una herramienta fundamental para reducir la intervención humana en

el proceso de caracterización. Esto ha permitido minimizar riesgos asociados al manejo de hidrógeno y mejorar la seguridad en el laboratorio.

La automatización ha eliminado la variabilidad introducida por factores humanos, mejorando la precisión y consistencia de los datos recopilados. Esto resulta en una ejecución de procesos más confiable y repetible de los materiales.

El sistema desarrollado no solo beneficia directamente al CIEMTEC, sino que también abre nuevas oportunidades para colaboraciones internacionales y publicaciones científicas, consolidando la posición del centro como un referente en la caracterización de materiales.

A pesar de las limitaciones iniciales, como el fallo del convertidor A/D del sensor de presión y la necesidad de simulaciones para validar ciertos aspectos, el proyecto logró cumplir con los requerimientos clave, destacando la importancia de una planificación flexible y adaptable.

En conclusión, este proyecto representa un avance significativo en la automatización de procesos de caracterización de materiales, ofreciendo al CIEMTEC una herramienta moderna y eficiente que contribuye al desarrollo de la ciencia de materiales en Costa Rica. El sistema no solo cumple con las necesidades del cliente, sino que también establece una base sólida para futuras mejoras y aplicaciones.

## 6.2 Trabajos a futuro

Finalmente, se incluyen algunas recomendaciones de trabajos a futuro que se pueden realizar con el fin de mejorar la seguridad y eficiencia del equipo.

### 6.2.1 Detección de fugas

Inclusión de detectores de hidrógeno fijos en puntos estratégicos del laboratorio. Estos dispositivos activarán una alarma en caso de fuga. Además, realizar inspecciones visuales regulares de las tuberías y conexiones para detectar posibles fugas.

### 6.2.2 Ventilación

Adaptación de sistemas de ventilación forzada que renueve continuamente el aire del laboratorio, especialmente en las zonas donde se manipule hidrógeno. Las campanas de extracción local para capturar cualquier fuga de hidrógeno en las áreas de trabajo pueden ser otra opción. En las Figuras

### 6.2.3 Equipo de protección personal (EPP)

Utilización de guantes resistentes a químicos para manipular equipos y materiales que puedan entrar en contacto con hidrógeno. También es importante contar con gafas de seguridad

para proteger ojos de posibles salpicaduras o proyecciones. Por último, la utilización de ropa de trabajo adecuada, como batas de laboratorio, para evitar que la ropa se impregne de hidrógeno.

#### **6.2.4 Mantenimiento preventivo**

Realizar inspecciones regulares de las instalaciones y equipos para detectar posibles problemas de seguridad y fallo de componentes.

#### **6.2.5 Bomba de vacío**

La bomba utilizada actualmente para generar vacío no es la mejor opción debido a que requiere estar a presión atmosférica para funcionar adecuadamente. Además, no logra llegar a 0 kPa con la precisión que se desearía. Se recomienda una bomba diferente la cual se ajuste a la presión del sistema y aumente la seguridad de este.

# Bibliografía

- [1] I. T. de Costa Rica. Qué es el tec. [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>
- [2] CIEMTEC. Reglamento del centro de investigación y extensión en ciencia e ingeniería de los materiales (ciemtec). [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/reglamento-centro-investigacion-extension-ciencia-ingenieria-materiales-ciemtec>
- [3] CIEMTEC. Centro de investigación y extensión en ingeniería de los materiales (ciemtec). [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/centro-investigacion-extension-ingenieria-materiales-ciemtec>
- [4] CIEMTEC. Caracterización de materiales y ensayos no destructivos. [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/ciemtec-caracterizacion-materiales-ensayos-no-destructivos>
- [5] J. L. Carrillo-Bucio, J. R. Tena-Garcia, E. P. Armenta-Garcia, O. Hernandez-Silva, J. G. Cabañas-Moreno, and K. Suárez-Alcántara, “Low-cost sieverts-type apparatus for the study of hydriding/dehydriding reactions,” *Universidad Nacional Autónoma de México*, 2018.
- [6] T. Voskuilen, Y. Zheng, and T. Pourpoint, “Development of a sievert apparatus for characterization of high pressure hydrogen sorption materials,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010.
- [7] CIEMTEC. Estudiantes y profesores de la escuela de ciencia e ingeniería en materiales y la escuela de física. [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/estudiantes-profesores-escuela-ciencia-ingenieria-materiales-escuela-fisica-publican-articulo>
- [8] CIEMTEC. Investigadores de la escuela de ciencia e ingeniería de materiales y ciemtec presentan en una conferencia. [En línea]. Disponible: <https://www.tec.ac.cr/investigadores-escuela-ciencia-ingenieria-materiales-ciemtec-presentan-conferencia-internacional>
- [9] A. Innovation. Caracterización de materiales: Conoce sus propiedades. (2024). [En línea]. Disponible: <https://atriainnovation.com/servicios/materiales-ensayos/caracterizacion/#:~:text=La%20caracterizaci%C3%B3n%20avanzada%20de%20materiales%20nos%20ayuda%20a%20conocer%20a,productos%20eficientes%2C%20duraderos%20y%20seguros.>

- [10] I. I. Consulting. Caracterización de materiales. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/caracterizacion-materiales/>
- [11] N. S. R. Data. Libro del web de química del nist, srd 69. (2023). [En línea]. Disponible: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=hydrogen&Units=SI>
- [12] N. S. R. Data. The future of hydrogen. (2019). [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [13] C. N. del Hidrógeno. ¿que es el hidrogeno? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20es%20el%20primer,es%20ins%C3%ADpido%2C%20inoloro%20e%20inodoro.>
- [14] S. Belkhiria, A. Alsawi, I. Hraiech, M. H. Dhaou, and A. Jemni, “Experimental and mathematical investigation of hydrogen absorption in  $lani_5$  and  $la_{0.7}ce_{0.1}ga_{0.3}ni_5$  compounds,” *Metals*, 2024.
- [15] M. Żurek and W. Zajac. Investigation of the hydrogen absorption by the  $lani_5$  and  $lani_{4.75}pb_{0.25}$  alloys using a statistical physics model. (2022). [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2673-4141/3/3/22>
- [16] S. Kumar, Y. Kojima, and G. K. Dey. Thermodynamics and kinetics of hydrogen absorption–desorption of highly crystalline  $lani_5$ . (2018). [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-018-7403-8>
- [17] G. Industrias. ¿qué es un plc y cómo funciona? (2021). [En línea]. Disponible: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona>
- [18] TECNOELITE. El microcontrolador. [En línea]. Disponible: <https://tecnoelite.co/que-es-un-microcontrolador-tipos-usos-y-historia/>
- [19] R. E. de Electrónica. Qué es un microcontrolador, funcionamiento y tipos. (2022). [En línea]. Disponible: <https://www.redeweb.com/actualidad/que-es-un-microcontrolador/>
- [20] M. Electronics. ¿que es raspberry pi? [En línea]. Disponible: <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>
- [21] T. E. Components. ¿cómo elegir el microcontrolador adecuado para su proyecto? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/58382/como-elegir-el-microcontrolador-adecuado-para-su-proyecto/>
- [22] I. N. de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică Tehnică IFT Iași. Sievert pct pro 2000. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.phys-iasi.ro/en/sievert-pct-pro-2000>
- [23] ERA, “Ameno,” *Dorime*, 2024.
- [24] K. Technologies. Gaspro. (2024). [En línea]. Disponible: <https://setaramsolutions.com/product/gaspro>

- [25] H. Isochema. Imi-htp. (2024). [En línea]. Disponible: <https://hidenisochema.com/hiden-products/imi-htp/>
- [26] H. Isochema. Espectrómetro de masa qga. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.directindustry.es/prod/hiden-analytical/product-16750-2415310.html>
- [27] P. Vacuum. Pfeiffer vacuum capilar. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.idealvac.com/es-cl/svpproduct.asp?PID=b1975082ec&optn=>
- [28] M. Instruments. Analizador ftir. (2024). [En línea]. Disponible: <https://intercovamex.com/producto/analizador-ftir/>
- [29] E. S. VALVES. Pneumatic solenoid valves - operation, types and benefits. [En línea]. Disponible: <https://electricsolenoidvalves.com/blog/pneumatic-solenoid-valves-operation-types-benefits/>
- [30] M. automatización. ¿qué es una válvula neumática? (2019). [En línea]. Disponible: <https://ar.microautomacion.com/es/definicion-valvula-neumatica/#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20neum%C3%A1ticas%20son%20los,el%20caudal%20de%20aire%20comprimido.>
- [31] TAMESON. Pneumatic manifold working principle. (2024). [En línea]. Disponible: <https://tameson.com/pages/pneumatic-manifolds>
- [32] K. L. Enterprise. Cómo funcionan los reguladores de presión electrónicos. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.genndih.com/is/is.genndih.com/es/how-electronic-pressure-regulators-work/index.html>
- [33] Z. E. Jeroish, K. S. Bhuvaneshwari, F. Samsuri, and V. Narayanamurthy, “Microheater: material, design, fabrication, temperature control, and applications—a role in covid-19,” *Biomedical Microdevices*, 2021.
- [34] OMEGA. What is a pid controller? (2014). [En línea]. Disponible: <https://www.omega.com/en-us/resources/pid-controllers>
- [35] Zurich-Instruments. Principles of pid controllers. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.zhinst.com/ch/en/resources/principles-of-pid-controllers>
- [36] L. Community. ¿cómo se pueden utilizar los controladores pid para regular la presión en el diseño de ingeniería? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-use-pid-controllers-regulate-pressure-ci8ne?lang=es&originalSubdomain=es>
- [37] M. A. Golato. Acciones de control. (2016). [En línea]. Disponible: [https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5\\_Acciones-de-control\\_2016.pdf](https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf)

- [38] U. D. Bosco. El controlador on-off. (2019). [En línea]. Disponible: [https://www.udb.edu.sv/udb\\_files/recursos\\_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/iii/guia-8.pdf](https://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/iii/guia-8.pdf)
- [39] SPARKFUN. I2c. [En línea]. Disponible: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>
- [40] T. INSTRUMENTS. The rs-485 design guide. (2021). [En línea]. Disponible: <https://www.ti.com/lit/an/slla272d/slla272d.pdf>
- [41] A. Rodríguez. Rs 232 vs rs485 vs rs-422. (2014). [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/slideshow/rs-232-vs-rs485-vs-rs422/34274998>
- [42] Tenveo. Cómo funciona la comunicación serial rs232. (2019). [En línea]. Disponible: <https://www.tenveo-video-conference-es.com/info/how-rs232-serial-communication-works-33863320.html>
- [43] K. T Ulrich and S. D Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*. McGrawHill Education, 2012.
- [44] J. Crespo, “Módulo 1. sesión 2: “fase 0” (o de problema percibido) y determinación de necesidades,” 2024. [En línea]. Disponible: <http://www.ie.itcr.ac.cr/palvarado/Modelos/modelos.pdf>
- [45] B. F. C. Systems. Hydrogen valves for your  $h_2$  applications. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.burkert.com/en/more-about/hydrogen-valves-for-your-h-applications>
- [46] E. G. Adecco. ¿cuántas horas de formación puede realizarse como máximo al día? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.trabajandoenti.com/blog/cuantas-horas-formacion-puedes-realizar-al-dia>
- [47] Astera. ¿qué es la extracción de datos: técnicas, herramientas y mejores prácticas? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.astera.com/es/type/blog/what-is-data-extraction-a-brief-guide/>
- [48] INTELEC. Pc recertificada dell sff optiplex 7060 ci7 – 8700 – 16gb – 256 gb ssd -w10pro. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.intelec.co.cr/product/pc-recertificada-dell-sff-optiplex-7060-ci7-8700-16gb-256-gb-ssd-w10pro1/>
- [49] Astera. ¿qué es la extracción de datos: técnicas, herramientas y mejores prácticas? (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.campusciberseguridad.com/blog/item/181-8-lenguajes-programacion-experto-ciberseguridad-debe-conocer#:~:text=Los%20lenguajes%20de%20programaci%C3%B3n%20m%C3%A1s%20utilizados%20en%20Ciberseguridad%20son%20,%2C%20PowerShell%2C%20Ruby%20y%20Assembly.>
- [50] MathWorks. Matlab. (2024). [En línea]. Disponible: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

- [51] H. GmbH. Direct-acting 2/2-way plunger valve up to 900 bar – type 6080. (2024). [En línea]. Disponible: <https://hyfindr.com/en/shop/products/direct-acting-2-2-way-plunger-valve-up-to-900-bar-type-6080>
- [52] MICROJPM. 8-channel 5v relay module sainsmart. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/a8-channel-5v-relay-module-sainsmart/>
- [53] Cole-Palmer. Ashcroft g2 pressure transducer, 0 to 1000 psi, 4 to 20 ma. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.coleparmer.com/i/ashcroft-g2-pressure-transducer-0-to-1000-psi-4-to-20-ma/6890058>
- [54] Cole-Palmer. Wika a-10 pressure transmitter. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.coleparmer.com/p/wika-a-10-pressure-transmitter/54808>
- [55] Autonics. Serie tk controladores de temperatura pid de alto rendimiento. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.autonics.com/ve/series/TK>
- [56] M. Electronics. E5cc-qx2asm-800. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.mouser.co.cr/ProductDetail/Omron-Automation-and-Safety/E5CC-QX2ASM-800?qs=C8aJjQqBHT1t%2FSEtYtO79g%3D%3D>
- [57] H. I. Automation. Udc3500 din controller. (2024). [En línea]. Disponible: <https://process.honeywell.com/us/en/products/process-instruments/controllers-and-programmers/1-4-din-controllers/udc3500-din-controller#overview>
- [58] OMEGA. Controladores pid de temperatura. (2024). [En línea]. Disponible: [https://es.omega.com/pptst/CN740\\_SERIES.html](https://es.omega.com/pptst/CN740_SERIES.html)
- [59] G. Community. Library. (2024). [En línea]. Disponible: <https://grabcad.com/library>
- [60] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley and Sons, 2017.
- [61] W. G. Coleman, H. W. y Steele, *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. John Wiley and Sons, 2009.
- [62] P. Chac. Tamaño de la muestra para la media (población infinita). (2021). [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=g6oCvjIIBiY>
- [63] F. O. Serrano, “Técnicas estadísticas aplicadas en nutrición y salud,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ugr.es/~fmocan/MATERIALES%20DOCTORADO/testt2016.pdf>
- [64] A. Ingrid. Estadística.tabla tstudent. (2014). [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/slideshow/estadisticatabla-tstudent/41630994>
- [65] CFIA. Incorporación y colegiatura. (2024). [En línea]. Disponible: <https://cfia.or.cr/site/incorporacion-y-colegiatura/>

# Apéndice A

## Formulario de clasificación de importancia de necesidades interpretadas

El siguiente formulario presentado entre las Figuras [A.1](#) y [A.9](#) fue respondido por el asesor industrial Adrián Quesada.

No se pueden editar las respuestas

## Encuesta de automatización de proceso de caracterización de niveles de Hidrógeno en Materiales

Para cada una de las siguientes funciones del sistema, por favor indique en una escala del 1 al 5 qué tan importante es esa función para usted. Por favor use la siguiente escala:

1. La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2. La función no es relevante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5. La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

También, indique con una marca en la casilla debajo de cada función, si usted piensa que la función es única, inesperada y/o interesante.

Acrónimo utilizado:  
SD = Solución Deseada

\* Indica que la pregunta es obligatoria

Correo electrónico \*

adquesada@itcr.ac.cr

**Figura A.1:** Encuesta hecha al cliente parte 1.

1. La SD minimiza desperdicios de hidrógeno por errores humanos. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

2. El uso de la SD es amigable con el usuario. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.2:** Encuesta hecha al cliente parte 2.

3. La SD cuenta con una interfaz donde se visualizan gráficas de temperatura y presión en tiempo real. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

4. La SD registra y almacena datos de temperatura, presión y tiempo, en un formato compatible con herramientas de graficación, como CSV. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

5. El SD puede conectarse con dispositivos externos. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.3:** Encuesta hecha al cliente parte 3.

6. El sistema de alimentación de la SD es compatible con los recursos disponibles en el laboratorio. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

7. La SD permite el monitoreo remoto para evitar la necesidad de estar físicamente presente durante todo el proceso. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

8. La SD notifica al usuario eventos de interés como errores en el proceso o finalización de este. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.4:** Encuesta hecha al cliente parte 4.

9. La SD controla un rango de presión de 0 kPa a 1000 kPa. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

10. La SD mide presión con una precisión mínima  $\pm 0.1$  kPa. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

11. La SD controla un rango de temperatura de 25 °C a 600 °C en el horno. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.5:** Encuesta hecha al cliente parte 5.

12. La SD mantiene la temperatura de la cámara constante. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

13. La SD mide temperatura con una precisión mínima de  $\pm 0.1$  °C. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

14. La SD ejecuta un proceso de limpieza del sistema. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.6:** Encuesta hecha al cliente parte 6.

15. La SD obtiene datos de las variables críticas mediante un proceso de caracterización definido por variación de presiones y temperatura. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

16. La SD ejecuta un proceso respectivo automáticamente luego de que el usuario lo indique. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

17. La SD permite retirar la muestra del sistema sin perder la presión en la cámara. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.7:** Encuesta hecha al cliente parte 7.

18. La SD realiza un proceso de prueba de pérdidas de presión. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

19. La SD utiliza piezas estándar. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

20. El SD cuenta con documentación y software propios del cliente. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

-

**Figura A.8:** Encuesta hecha al cliente parte 8.

21. El SD es fabricado dentro del margen del presupuesto deseado. \*

1      2      3      4      5

Marque la casilla si la función anterior le parece única y/o interesante.

Comentarios adicionales

.....

Enviado el 12/8/24, 9:00 a.m.

**Figura A.9:** Encuesta hecha al cliente parte 9.

# Apéndice B

## Conceptos generados

Las combinaciones de conceptos generados para cada uno de los tres subproblemas planteados en la descomposición funcional del problema general, se observan en las Figuras [B.1](#), [B.2](#), [B.3](#) y [B.4](#) respectivamente.

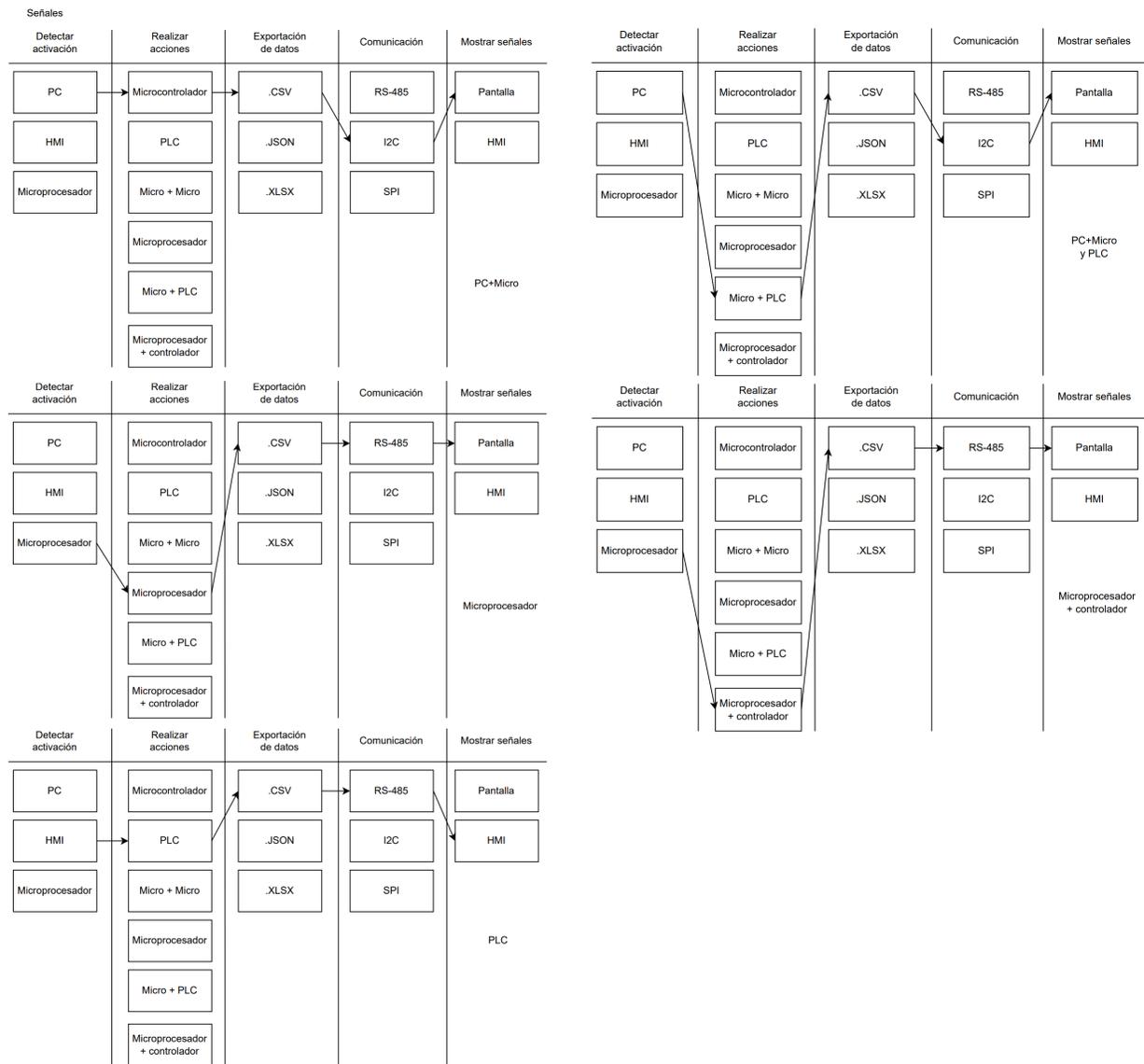


Figura B.1: Conceptos generados para la detección y procesamiento de señales de la interfaz de control.

Energía e Interfaz

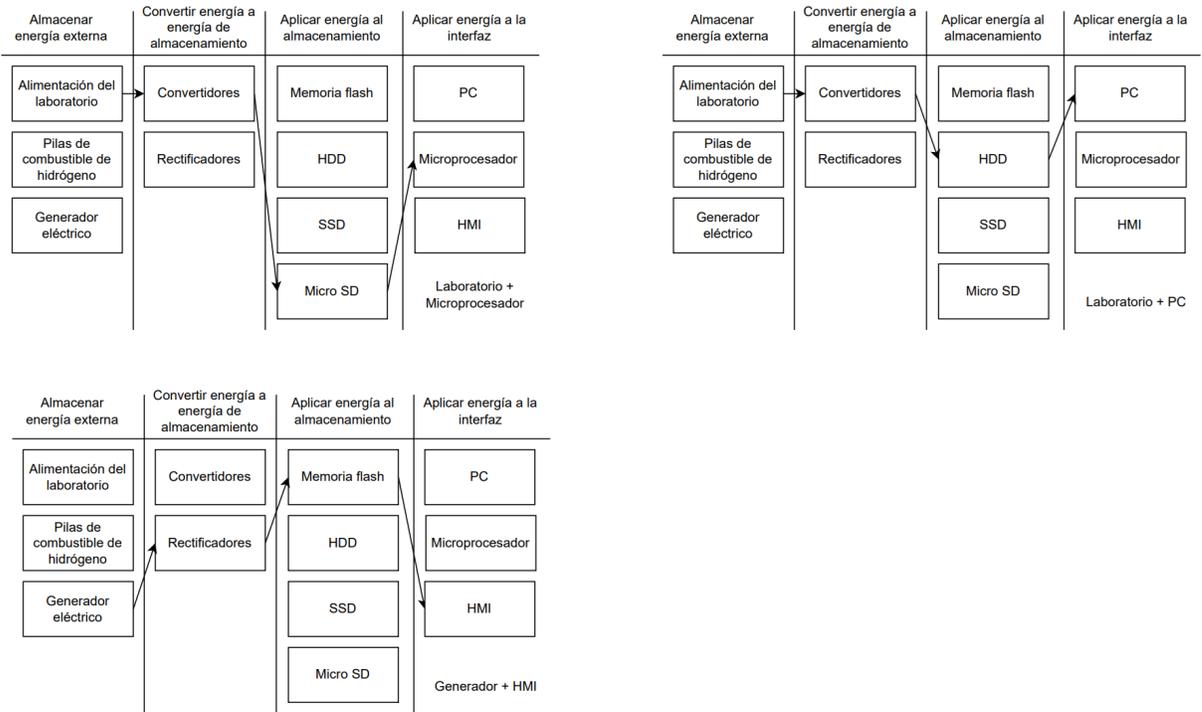
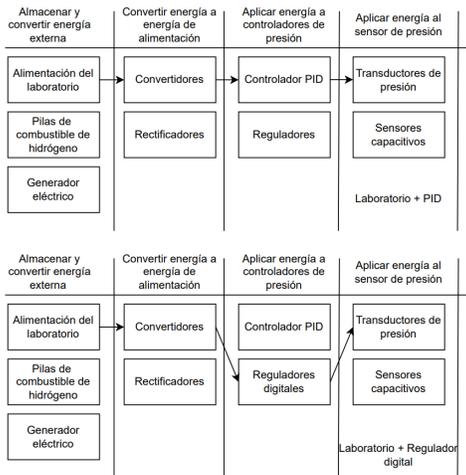


Figura B.2: Conceptos generados para procesamiento de energía de la interfaz de control.

Energía a actuadores de presión



Energía a actuadores de temperatura

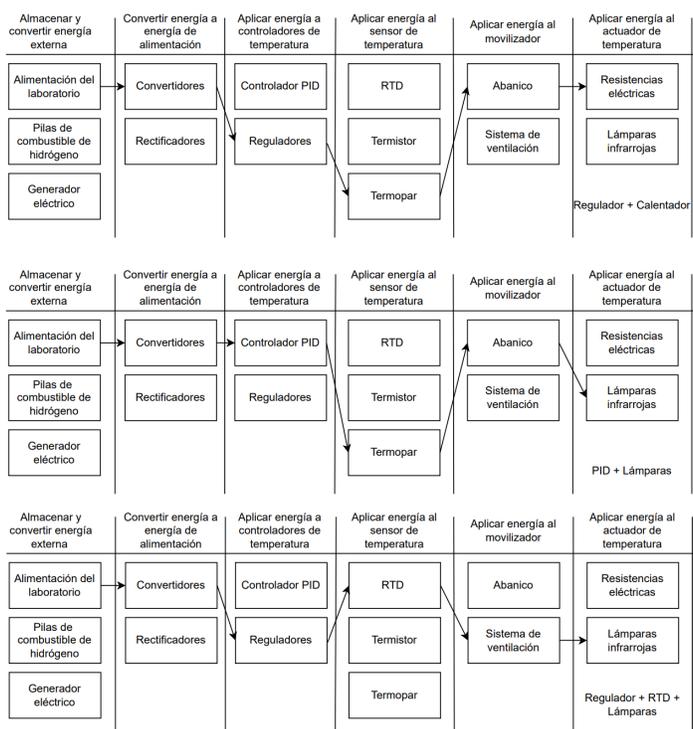


Figura B.3: Conceptos generados para el bloque de control de presión y temperatura.

Energía a actuadores

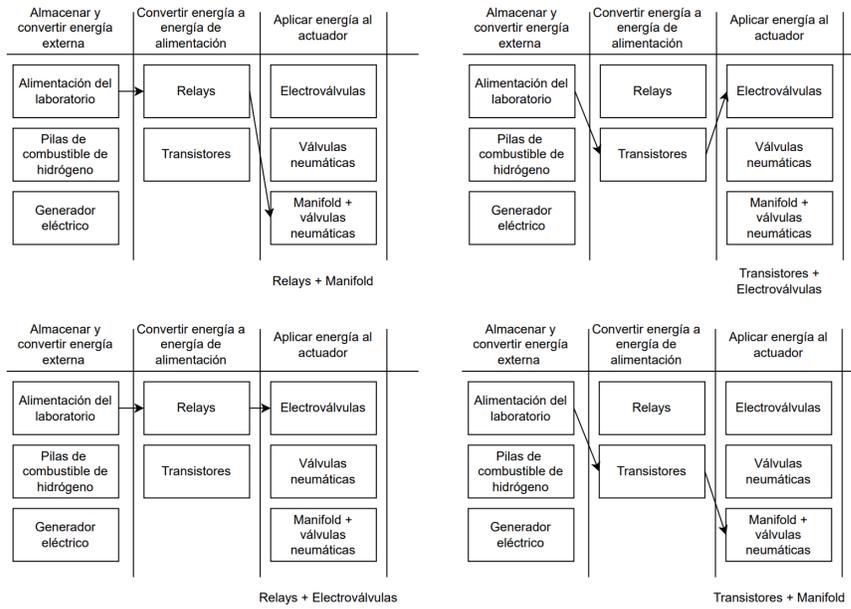


Figura B.4: Conceptos generados para el bloque de control válvulas.

## Apéndice C

### Diagnóstico Equipo PCT y utilización del sistema

# Diagnóstico Equipo PCT y utilización del sistema

## INICIACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

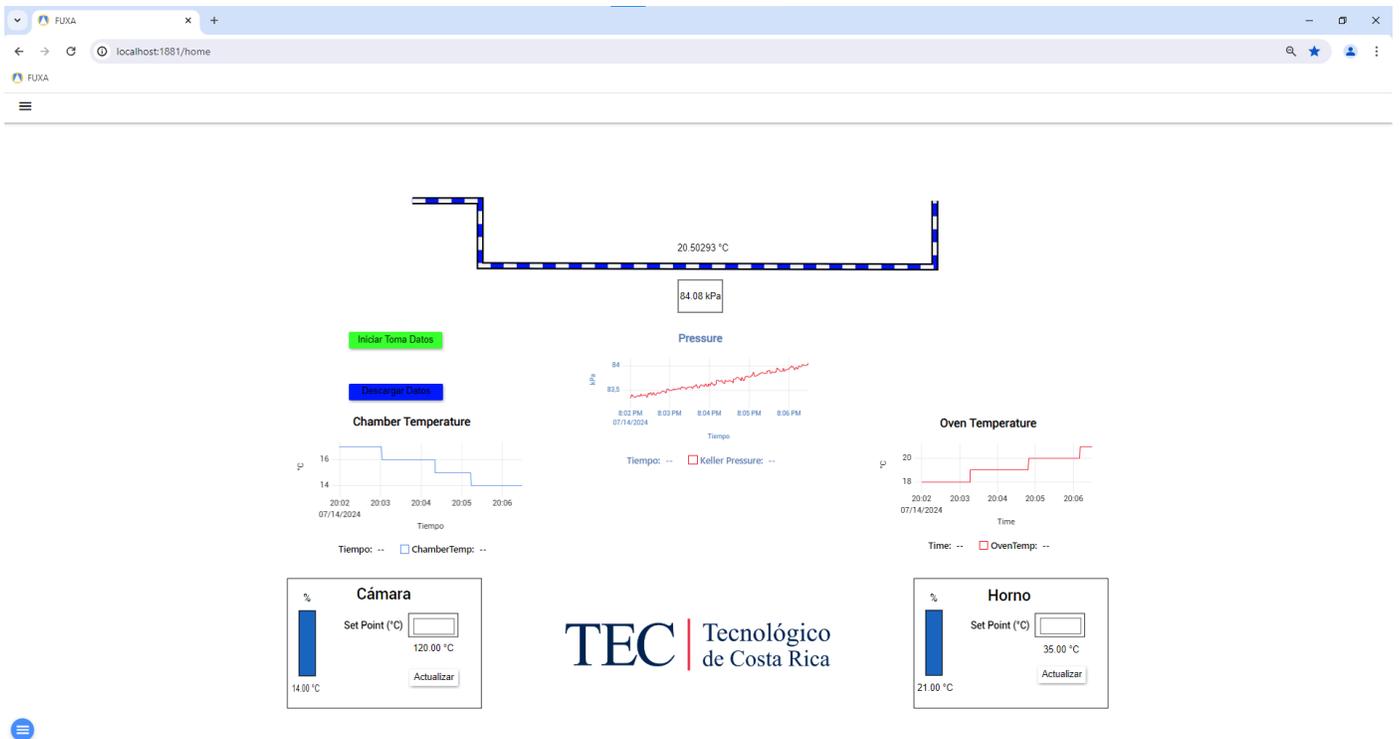
### Iniciación del sistema

Para ejecutar la interfaz del sistema:

- Encender controladores de temperatura
- Abrir el explorador de archivos.
  - PCT-main
    - Executables
      - Ejecutar WindosExec
- Abrir navegador web
  - Pestaña de favoritos
    - FUXA

### Interfaz

La interfaz presenta 3 gráficas. Una para la temperatura en la cámara, una para la temperatura en el horno y una para la presión en el sistema. Desde esta, se puede iniciar la toma de datos, la cual registra valores de presión, temperatura y tiempo. Además, se pueden descargar los datos registrados.



## Encendido de controladores de temperatura

Los controladores de temperatura se deben encender mediante un potenciómetro. Antes de ingresar el valor de temperatura que se desea, primeramente se debe configurar el controlador manualmente:

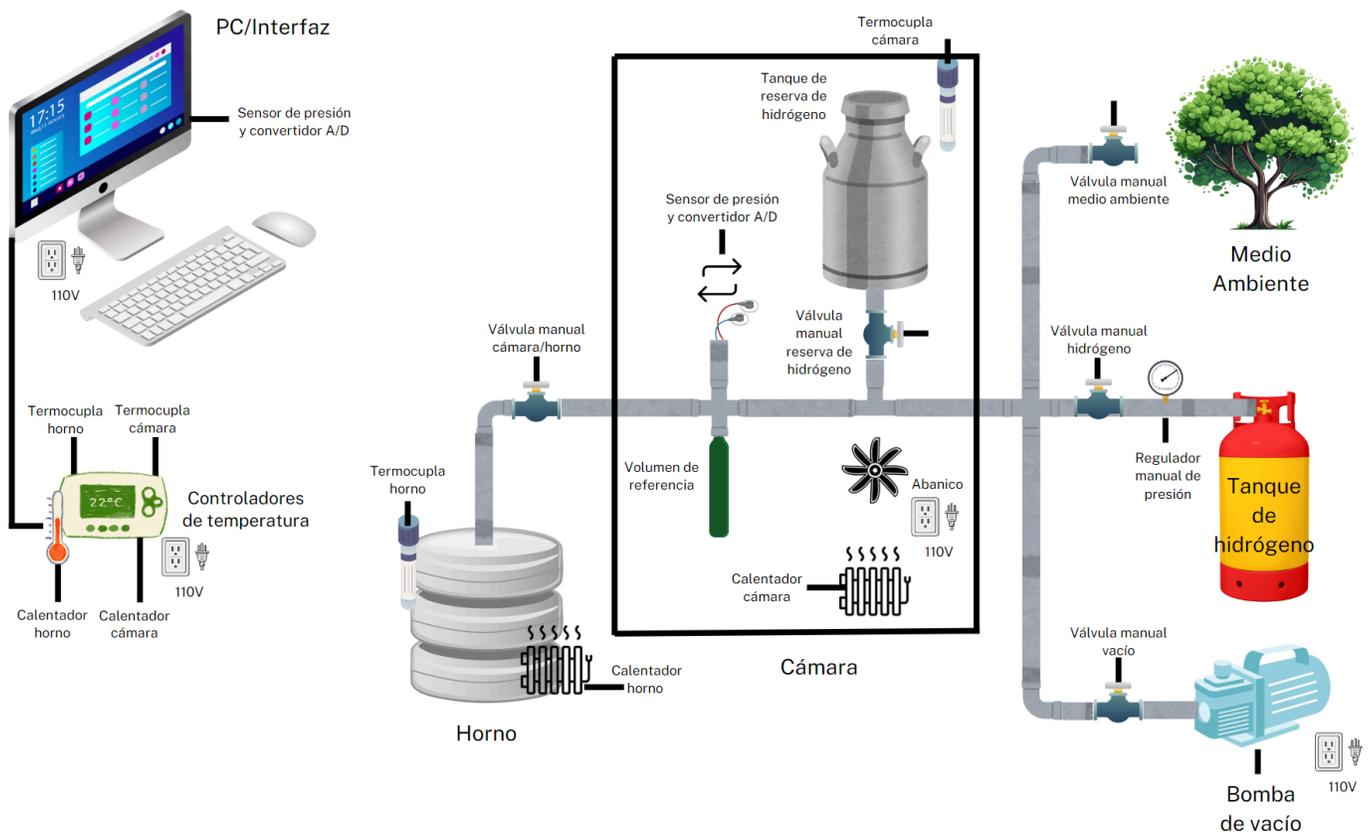
- Mantener presionado MODE
- Seleccionar Par 2
- Presionar MODE
- Seleccionar At (Autotuning)
  - Seleccionar ON
- Presionar MODE

Una vez configurado se puede establecer la temperatura deseada en la cámara y en el horno. Se debe esperar a que la temperatura llegue a su objetivo. Se puede observar la gráfica de temperatura en la interfaz.

## Control de presión en el sistema

Primeramente, se debe revisar el estado de las válvulas. Todas deben estar cerradas, La presión que ingresa al sistema puede ser regulada manualmente mediante el manómetro que se encuentra conectado a la salida del tanque de hidrógeno. En la interfaz se puede observar una gráfica con la presión actual en el sistema.

## DIAGRAMA SISTEMA ACTUAL



## COMPONENTES

### Válvulas:

Las válvulas manuales se utilizan para controlar el flujo de gases dentro del sistema. Esto es crucial para garantizar que los gases se introduzcan o evacúen del sistema en las cantidades y momentos adecuados durante las diferentes etapas del proceso de hidrogenación/dehidrogenación.

Además, las válvulas manuales se utilizan para aislar diferentes partes del sistema durante ciertas etapas del proceso. Por ejemplo, pueden cerrarse para asegurar que el gas hidrógeno no escape durante la etapa de purgado o activación, o para evitar la contaminación del material con oxígeno o humedad ambiental.

### Controladores de temperatura:

Los controladores de temperatura se encargan de mantener la temperatura en el horno y en la cámara en valores determinados por el usuario. Utiliza calentadores (resistencias eléctricas) y termocuplas para controlar la temperatura mediante un PID. Utiliza comunicación RS-485.

### Bomba de vacío:

Utilizada para generar vacío en el sistema. Parte fundamental en el proceso de limpieza del sistema.

### Calentadores:

Conectados a los controladores de temperatura. Reciben electricidad para calentarse.

### Abanico:

Utilizado para esparcer el calor generado por el calentador en la cámara.

### Termocuplas:

Sensores de temperatura conectados a los controladores de temperatura. Sirven para monitorear el sistema y de realimentación a los controladores.

### Sensor de presión:

Sensor con convertidor A/D y comunicación RS-485 con la computadora. Utilizado para graficar presión en función del tiempo en la interfaz.

### Manómetro:

Sirve para regular manualmente la presión que ingresa al sistema. Presenta muchos errores de precisión.

### Volumen de referencia:

Utilizado para ejecutar la fórmula de porcentaje de absorción de hidrógeno en el material. Se compara con el volumen de cada tubería.

## ANÁLISIS DE RIESGOS

### Limpieza inicial del sistema

Se debe ejecutar un proceso de limpieza, purga o esterilización del sistema antes de ejecutar una prueba de caracterización o pérdidas de presión. Partículas de oxígeno combinadas con hidrógeno a altas presiones puede provocar llamas, por lo que primero se requiere hacer un vacío en el sistema, luego inundar con hidrógeno, para una vez más crear vacío y terminar la esterilización con hidrógeno en el sistema. Esto minimiza la cantidad de partículas de oxígeno presentes en el sistema.

### Bomba de vacío

La bomba de vacío presente en el sistema se utiliza en todos los procesos del equipo. Es fundamental entender que la bomba debe recibir en su entrada la presión atmosférica para poder ejecutar su función (llevar el sistema de aproximadamente 101,3 kPa a 0 kPa).

Si se utiliza la bomba de vacío a una presión muy alta respecto a la atmosférica, la presión podría dañar las paletas internas de esta, dañando el dispositivo. El sistema debe regular la presión a la presión atmosférica antes de abrir la válvula de control de vacío.

### Configuración de válvulas

Tabla 1. Configuraciones de válvulas parte 1.

Válvula medio ambiente	Válvula hidrógeno	Válvula vacío	Comentarios
0 = OFF	0	0	Mantiene presión
0	0	1 = ON	Evacúa presión. ADVERTENCIA. Si se evacúa a una presión muy alta se podría dañar la bomba
0	1	0	Ingresa presión
0	1	1	PELIGRO. Bomba puede dañarse y desperdicio de hidrógeno.
1	0	0	Evacúa presión. ADVERTENCIA. Si se evacúa a una presión muy alta podría provocar llamas.
1	0	1	PELIGRO. Bomba de vacío puede dañarse.
1	1	0	PELIGRO. Desperdicio de hidrógeno.
1	1	1	PELIGRO. Bomba puede dañarse y desperdicio de hidrógeno.

Tabla 2. Configuraciones de válvulas parte 2.

Válvula cámara/horno	Válvula reserva hidrógeno	Comentarios
0	0	Presión se mantiene en la cámara.
0	1	Ingresa presión extra.
1	0	Ingresa presión al horno.
1	1	Ingresa presión extra al horno.

Consideraciones adicionales:**1. Almacenamiento:**

- **Cilindros en posición vertical:** Los cilindros de hidrógeno deben almacenarse en posición vertical y asegurados a una pared o estructura fija.
- **Área de almacenamiento separada:** Si es posible, designar un área de almacenamiento separada para los cilindros de hidrógeno, lejos de fuentes de ignición.

**2. Manipulación segura:**

- **Evitar chispas:** No utilizar herramientas que puedan generar chispas cerca de la fuente de hidrógeno.
- **Evitar el calor:** No exponer los cilindros de hidrógeno a fuentes de calor.

**3. Conocimiento de las propiedades del hidrógeno:**

- **Densidad:** El hidrógeno es más ligero que el aire y tiende a acumularse en las partes altas de un recinto.
- **Inflamabilidad:** El hidrógeno es altamente inflamable y forma mezclas explosivas con el aire.
- **Incoloro e inodoro:** El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro, por lo que su presencia no puede detectarse por los sentidos.

## MEJORAS

- Señal de detención de actuadores

Es fundamental contar con un botón de detención de proceso y actuadores en un sistema.

- Alarmas/notificaciones

Contar con notificaciones de cuando se alcanza una presión/temperatura considerada como peligrosa o fuera de lo solicitado. Saber si un proceso ha sido iniciado o si este ha finalizado es información relevante.

- Diagrama del sistema físico que permita control manual

Un diagrama del sistema en la interfaz resultaría intuitivo para el usuario entender y saber qué está pasando en el sistema.

- Automatización del encendido y apagado de la bomba

La bomba de vacío es un dispositivo que requiere estar encendido. Se puede automatizar el paso de corriente a esta para controlar el aporte al sistema solo cuando sea requerido.

- Fugas de presión

Según lo observado en pruebas iniciales, el sistema presenta fugas leves en algunas conexiones, además, entre la válvula de hidrógeno y el regulador de presión manual, la tubería consiste en una manguera, la cual es muy extensa y puede provocar grandes pérdidas de presión. La recomendación es sustituir esta manguera por tubería de acero inoxidable.

## Apéndice D

Código implementado en la solución

## D.1 Código Arduino

```
Control_Relays_ARDUINO.ino
1 // Definición de pines
2 const int relayPin1 = 8; // Pin del relay 6 bomba vacio
3 const int relayPin2 = 9; // Pin del relay 5 camara/horno valve
4 const int relayPin3 = 10; // Pin del relay 4 reserva valve
5 const int relayPin4 = 11; // Pin del relay 3 vacio valve
6 const int relayPin5 = 12; // Pin del relay 2 hidrógeno valve
7 const int relayPin6 = 13; // Pin de comunicación
8 const int relayPin7 = 7; // Pin del relay 1 medio ambiente valve
9
10 // Estado inicial de los relés
11 bool relayState1 = HIGH; // bomba vacio
12 bool relayState2 = HIGH; // camara/horno valve
13 bool relayState3 = HIGH; // reserva valve
14 bool relayState4 = HIGH; // vacio valve
15 bool relayState5 = HIGH; // hidrógeno valve
16 bool relayState6 = HIGH; // relay de comunicación
17 bool relayState7 = HIGH; // medio ambiente valve
18
19
20 unsigned long lastSignalTime = 0; // Marca de tiempo del último comando recibido
21 unsigned long currMillis = 0;
22 const unsigned long timeout = 200; // Tiempo de espera (en ms) antes de apagar el pin
23
24
25 void setup() {
26     // Configuración de pines como salidas
27     pinMode(relayPin1, OUTPUT);
28     pinMode(relayPin2, OUTPUT);
29     pinMode(relayPin3, OUTPUT);
30     pinMode(relayPin4, OUTPUT);
31     pinMode(relayPin5, OUTPUT);
32     pinMode(relayPin6, OUTPUT);
33     pinMode(relayPin7, OUTPUT);
34
35     // Inicialización de los relés en estado apagado
36     digitalWrite(relayPin1, relayState1);
37     digitalWrite(relayPin2, relayState2);
38     digitalWrite(relayPin3, relayState3);
39     digitalWrite(relayPin4, relayState4);
40     digitalWrite(relayPin5, relayState5);
41     digitalWrite(relayPin6, relayState6);
42     digitalWrite(relayPin7, relayState7);
43
44     // Iniciar comunicación serial
45     Serial.begin(9600);
46
47 }
48
```

Figura D.1: Código implementado en ARDUINO UNO parte 1.

```
48
49 void loop() {
50 }
51
52 void off_all_valvulas() {
53     relayState1 = HIGH;
54     relayState2 = HIGH;
55     relayState3 = HIGH;
56     relayState4 = HIGH;
57     relayState5 = HIGH;
58     relayState6 = HIGH;
59     relayState7 = HIGH;
60
61     digitalWrite(relayPin1, relayState1);
62     digitalWrite(relayPin2, relayState2);
63     digitalWrite(relayPin3, relayState3);
64     digitalWrite(relayPin4, relayState4);
65     digitalWrite(relayPin5, relayState5);
66     digitalWrite(relayPin6, relayState6);
67     digitalWrite(relayPin7, relayState7);
68
69 }
```

Figura D.2: Código implementado en ARDUINO UNO parte 2.

## D.2 Código Python

```

1 from easymodbus.modbusClient import ModbusClient
2 import struct
3
4 class KellerPAA:
5     def __init__(self, port, baudrate=9600, parity='N', stopbits=1, slave_id=1):
6         """
7         Inicializa la conexión Modbus RTU con el sensor Keller.
8         :param port: Puerto COM donde está conectado el sensor (por ejemplo, 'COM3').
9         :param baudrate: Velocidad en baudios (por defecto 9600).
10        :param parity: Paridad ('N', 'E', 'O', por defecto 'N').
11        :param stopbits: Número de bits de parada (por defecto 1).
12        :param slave_id: Dirección del esclavo Modbus (por defecto 1).
13        """
14
15        self.client = ModbusClient(port)
16        self.client.baudrate = baudrate
17        self.client.parity = parity
18        self.client.stopbits = stopbits
19        self.client.unitidentifier = slave_id
20        self.client.connect()
21
22    def read_pressure(self):
23        """
24        Envía un mensaje para leer la presión desde el sensor utilizando Modbus.
25        :return: Valor de presión en bar (float) o None en caso de error.
26        """
27        try:
28            # Leer dos registros a partir de la dirección 2 (0x0002)
29            registers = self.client.read_inputregisters(2, 2)
30            if registers:
31                print(f"Registros recibidos: {registers}")
32                # Combinar los registros en un valor IEEE 754 de 32 bits
33                raw = (registers[0] << 16) | registers[1]
34                pressure = self._convert_ieee754_to_float(raw)
35                return pressure
36            else:
37                print("No se recibieron registros.")
38        except Exception as e:
39            print(f"Error al leer la presión: {e}")
40            return None
41
42    @staticmethod
43    def _convert_ieee754_to_float(value):
44        """
45        Convierte un entero de 32 bits a un número flotante IEEE 754.
46        :param value: Valor entero de 32 bits.
47        :return: Número flotante.
48        """
49        return struct.unpack('f', struct.pack('I', value))[0]
50
51    def close(self):
52        """
53        Cierra la conexión Modbus.
54        """
55        self.client.close()
56

```

Figura D.3: Código implementado en Python para la comunicación con el sensor de presión.

```

1 Tk4py x
2 import easymodbus.modbusClient
3
4 class Tk4(object):
5     def __init__(self, port: str, debug=False):
6         self.port = port
7         self.modbus_client = easymodbus.modbusClient.ModbusClient(self.port)
8         self.modbus_client.debug = debug
9         self.modbus_client.connect()
10
11    def start(self, identifier: int):
12        """
13        Starts Control
14        :param identifier: TK4 Unit Identifier
15        """
16        self.modbus_client.unitidentifier = identifier
17        self.modbus_client.write_single_coil(0, False)
18
19    def close(self):
20        """
21        Disconnects the modbus
22        """
23        self.modbus_client.close()
24
25    def stop(self, identifier: int):
26        """
27        Stops Control
28        :param identifier: TK4 Unit Identifier
29        """
30        self.modbus_client.unitidentifier = identifier
31        self.modbus_client.write_single_coil(0, True)
32
33    def set_unit(self, identifier: int, unit: int):
34        """
35        Sets Temperature Units for Readings
36        :param identifier: TK4 Unit Identifier
37        :param unit: 0 for °C / 1 for °F
38        """
39        self.modbus_client.unitidentifier = identifier
40        self.modbus_client.write_single_register(151, unit)
41
42    if self.modbus_client.read_holdingregisters(151, 1)[0] == 0:
43        unit = "°C"
44    else:
45        unit = "°F"
46    temp = self.modbus_client.read_inputregisters(1000, 1)[0]
47
48    def get_temperature(self, identifier: int) -> float:
49        """
50        Returns current temperature in given Unit
51        :param identifier: TK4 Unit Identifier
52        :return: Temperature in °C or °F
53        """
54        self.modbus_client.unitidentifier = identifier
55        temp = self.modbus_client.read_inputregisters(1000, 1)[0]
56        return temp
57

```

Figura D.4: Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 1.

```

61 def get_cooling_side(self, identifier: int) -> float:
62     """
63     Returns current MV Cooling Side
64     :param identifier: TK4 Unit Identifier
65     :return: Cooling Side %
66     """
67     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
68     cooling_side = self.modbus_client.read_inputregisters(1005, 1)[0] / 10
69     return cooling_side
70
71 def get_heating_side(self, identifier: int) -> float:
72     """
73     Returns current MV Heating Side
74     :param identifier: TK4 Unit Identifier
75     :return: Heating Side %
76     """
77     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
78     heating_side = self.modbus_client.read_inputregisters(1004, 1)[0] / 10
79     return heating_side
80
81 def set_value(self, identifier: int, value: float, unit: int):
82     """
83     Temperature Set Point for controller
84     :param identifier: TK4 Unit Identifier
85     :param value: Temperature Value either °C or °F
86     :param unit: 0 for °C / 1 for °F
87     """
88     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
89     self.modbus_client.write_single_register(151, unit)
90
91     self.modbus_client.write_single_register(57, value)
92
93 def get_setvalue(self, identifier: int) -> float:
94     """
95     Get Set Value
96     :param identifier: TK4 Unit Identifier
97     :return: Temperature Set Value
98     """
99     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
100     set_value = self.modbus_client.read_inputregisters(1003, 1)[0]
101     return set_value
102
103 def get_proportional(self, identifier: int) -> float:
104     """
105     Returns Heating Proportional value
106     :param identifier: TK4 Unit Identifier
107     :return: Heating Proportional Band either in °C or °F
108     """
109     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
110     proportional = self.modbus_client.read_holdingregisters(101, 1)[0] / 10
111     return proportional

```

**Figura D.5:** Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 2.

```

113 def set_proportional(self, identifier: int, value: float):
114     """
115     Sets Heating Proportional value
116     :param identifier: TK4 Unit Identifier
117     :param value: Proportional Value either in °C or °F
118     """
119     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
120     self.modbus_client.write_single_register(101, value * 10)
121
122 def get_integral(self, identifier: int) -> float:
123     """
124     Returns Heating Integral Time
125     :param identifier: TK4 Unit Identifier
126     :return: Heating Integral Time in Sec.
127     """
128
129     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
130     integral = self.modbus_client.read_holdingregisters(103, 1)[0]
131     return integral
132
133 def set_integral(self, identifier: int, value: float):
134     """
135     Sets Heating Integral Time
136     :param identifier: TK4 Unit Identifier
137     :param value: Time in Sec
138     """
139     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
140     self.modbus_client.write_single_register(103, value)
141
142 def get_derivative(self, identifier: int) -> float:
143     """
144     Returns Heating Derivative Time
145     :param identifier: TK4 Unit Identifier
146     :return: Heating Derivative Time in Sec.
147     """
148     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
149     derivative = self.modbus_client.read_holdingregisters(105, 1)[0]
150     return derivative
151
152 def set_derivative(self, identifier: int, value: float):
153     """
154     Sets Heating Derivative Time
155     :param identifier: TK4 Unit Identifier
156     :param value: Time in Sec
157     """
158     self.modbus_client.unitidentifier = identifier
159     self.modbus_client.write_single_register(105, value)
160

```

**Figura D.6:** Código implementado en Python para la comunicación con los controladores de temperatura parte 3.

## D.3 Código Matlab

### D.3.1 Scripts

En la Figura D.7 se encuentra la clase `Toggled_Switch`, la cual es una representación de un interruptor gráfico que puede alternar entre los estados de activado y desactivado.

Propiedades:

- `reference`: Es una referencia al componente gráfico (por ejemplo, un botón en una interfaz gráfica creada con App Designer).
- `color_On`: Define el color del componente cuando está activado.
- `color_Off`: Define el color del componente cuando está desactivado.
- `state`: Variable lógica que guarda el estado actual del interruptor (1 para ON y 0 para OFF).

Métodos:

- `turn_on`: Cambia el estado del interruptor a activado y actualiza su apariencia.
- `turn_off`: Cambia el estado del interruptor a desactivado y actualiza su apariencia.
- `get_state`: Retorna el estado actual del interruptor (1 o 0).

```

1 classdef Toggled_Switch
2     % Clase Toggled_Switch para representar un interruptor con estado ON/OFF
3     % que cambia de color según su estado y referencia un componente de interfaz gráfica.
4
5     properties
6         reference % Referencia al objeto de interfaz gráfica (UI Component)
7         color_On % Color para el estado ON (activado)
8         color_Off % Color para el estado OFF (desactivado)
9         state % Estado actual del interruptor (1 para ON, 0 para OFF)
10    end
11
12    methods
13        function obj = Toggled_Switch(reference, color_On, color_Off)
14            % Constructor de la clase Toggled_Switch
15            % reference: Referencia al objeto gráfico (como un botón)
16            % color_On: Color que se usará cuando el interruptor esté activado
17            % color_Off: Color que se usará cuando el interruptor esté desactivado
18
19            obj.reference = reference;
20            obj.color_On = color_On;
21            obj.color_Off = color_Off;
22            obj.state = 0; % Inicialmente, el estado está en OFF (0)
23        end
24
25        function obj = turn_on(obj)
26            % Método para encender (activar) el interruptor
27            ref = obj.reference; % Accede a la referencia del componente gráfico
28            ref.Value = true; % Establece el valor lógico a true (activado)
29            ref.BackgroundColor = obj.color_On; % Cambia el color al color de estado ON
30            obj.reference = ref; % Actualiza la referencia
31            obj.state = 1; % Cambia el estado a ON
32        end
33
34        function obj = turn_off(obj)
35            % Método para apagar (desactivar) el interruptor
36            ref = obj.reference; % Accede a la referencia del componente gráfico
37            ref.Value = false; % Establece el valor lógico a false (desactivado)
38            ref.BackgroundColor = obj.color_Off; % Cambia el color al color de estado OFF
39            obj.reference = ref; % Actualiza la referencia
40            obj.state = 0; % Cambia el estado a OFF
41        end
42
43        function obj = get_state(obj)
44            % Método para obtener el estado actual del interruptor
45            % Retorna 1 si el estado es ON o 0 si es OFF
46            obj = obj.state;
47        end
48    end
49 end
50
51 c+

```

Figura D.7: Código implementado en MATLAB para control de switches.

En las Figuras D.8 y D.9 se encuentra la clase Relay, la cual representa un relé conectado a un pin digital que puede ser controlado desde una aplicación de MATLAB.

Propiedades:

- app: Referencia a la aplicación principal que incluye la conexión al hardware (como un objeto Arduino).
- pin: Pin digital al que está conectado el relé.
- reference: Opcional, componentes gráficos (botones, lámparas) que representan el estado del relé en la interfaz de usuario.
- status: Estado lógico actual del relé (1 para encendido y 0 para apagado).

Métodos:

- turn\_on: Activa el relé y actualiza el estado gráfico de los componentes asociados.
- turn\_off: Desactiva el relé y actualiza el estado gráfico.
- get\_state: Devuelve el estado actual del relé.
- Enable: Habilita o deshabilita los componentes gráficos asociados, útil para bloquear la interacción del usuario en ciertos escenarios.

```

1 classdef Relay
2     % Clase Relay para manejar el control de un relé conectado a un pin digital
3     % y opcionalmente asociado a componentes de interfaz gráfica.
4
5     properties (Access = private)
6         app % Referencia a la aplicación principal (contiene la conexión al hardware)
7         pin % Pin digital al que está conectado el relé
8         reference % Referencia a los componentes de interfaz gráfica asociados al relé
9         status % Estado actual del relé (1 para ON, 0 para OFF)
10    end
11
12    methods
13        function obj = Relay(app, pin, reference)
14            % Constructor de la clase Relay
15            % app: Referencia a la aplicación principal
16            % pin: Pin digital al que está conectado el relé
17            % reference: Opcional, referencias a componentes gráficos asociados al relé
18
19            obj.app = app; % Almacena la referencia de la aplicación principal
20            obj.pin = pin; % Almacena el pin digital del relé
21            obj.reference = reference; % Almacena los componentes gráficos asociados
22            obj.status = 0; % Inicializa el estado como OFF (0)
23        end
24
25        function obj = turn_on(obj)
26            % Método para encender (activar) el relé
27            % Cambia el estado gráfico de los componentes asociados y activa el pin digital
28
29            if ~isempty(obj.reference) % Verifica si hay referencias gráficas asociadas
30                for i = 1:numel(obj.reference) % Itera sobre todas las referencias gráficas
31                    if isvalid(obj.reference(i)) % Verifica si la referencia es válida
32                        referencia = obj.reference(i);
33                        referencia.BackgroundColor = [0.39, 0.82, 0.07]; % Cambia el color a verde
34                        referencia.Value = true; % Activa el estado del componente gráfico
35                        obj.reference(i) = referencia; % Actualiza la referencia
36                    end
37                end
38            end
39
40            % Envía señal al pin digital para activar el relé (0: encender)
41            writeDigitalPin(obj.app.s, obj.pin, 0);
42            obj.status = 1; % Cambia el estado del relé a ON
43        end
44    end
45 end

```

Figura D.8: Código implementado en MATLAB para control de relés individualmente parte 1.

```

45 function obj = turn_off(obj)
46 % Método para apagar (desactivar) el relé
47 % Cambia el estado gráfico de los componentes asociados y desactiva el pin digital
48
49 if obj.status == 1 % Verifica si el relé está actualmente encendido
50 if ~isempty(obj.reference) % Verifica si hay referencias gráficas asociadas
51 for i = 1:numel(obj.reference) % Itera sobre todas las referencias gráficas
52 if isvalid(obj.reference{i}) % Verifica si la referencia es válida
53 referencia = obj.reference{i};
54 referencia.BackgroundColor = [0.94, 0.94, 0.94]; % Cambia el color a gris
55 referencia.Value = false; % Desactiva el estado del componente gráfico
56 obj.reference{i} = referencia; % Actualiza la referencia
57 end
58 end
59 end
60
61 % Envía señal al pin digital para desactivar el relé (1: apagar)
62 writeDigitalPin(obj.app.s, obj.pin, 1);
63 obj.status = 0; % Cambia el estado del relé a OFF
64 end
65 end
66
67 function state = get_state(obj)
68 % Método para obtener el estado actual del relé
69 % Devuelve 1 si está encendido (ON) o 0 si está apagado (OFF)
70
71 disp(['state ', num2str(obj.status)]) % Muestra el estado en la consola
72 state = obj.status; % Devuelve el estado
73 end
74
75 function obj = Enable(obj, state)
76 % Método para habilitar o deshabilitar los componentes gráficos asociados
77 % state: Valor lógico (true o false) para habilitar/deshabilitar
78
79 for i = 1:numel(obj.reference) % Itera sobre todas las referencias gráficas
80 if isvalid(obj.reference{i}) % Verifica si la referencia es válida
81 referencia = obj.reference{i};
82 referencia.Enable = state; % Habilita o deshabilita el componente
83 obj.reference{i} = referencia; % Actualiza la referencia
84 end
85 end
86 end
87 end
88 end

```

**Figura D.9:** Código implementado en MATLAB para control de relés individualmente parte 2.

En las Figuras D.10 y D.11 se encuentra la clase RelaysController, la cual sirve para gestionar y controlar múltiples relés de manera centralizada.

Propiedades:

- `relays_map`: Un contenedor tipo mapa (`containers.Map`) que asocia nombres de relés con sus objetos Relay.

Métodos:

- `get_relay`: Devuelve un relé específico del mapa.
- `set_relay`: Actualiza un relé en el mapa con un nuevo estado.
- `turn_all_off`: Apaga todos los relés del mapa.
- `turn_all_off_except`: Apaga todos los relés excepto uno especificado.
- `disable_all`: Apaga y deshabilita la interacción gráfica de todos los relés.
- `enable_all`: Habilita la interacción gráfica de todos los relés.

```

1 classdef RelaysController
2     % Clase RelaysController: Controlador para gestionar múltiples relés almacenados en un mapa.
3
4     properties
5         relays_map % Mapa que contiene el nombre de los relés como clave y los objetos Relay como valor
6     end
7
8     methods
9         function obj = RelaysController(relays_map)
10            % Constructor de la clase RelaysController
11            % relays_map: Mapa que asocia nombres de relés con sus objetos correspondientes
12
13            obj.relays_map = relays_map; % Inicializa el mapa de relés
14        end
15
16        function relay = get_relay(obj, name)
17            % Obtiene un relé específico del mapa
18            % name: Nombre del relé
19            % Devuelve el objeto Relay asociado
20
21            relay = obj.relays_map(name); % Busca y devuelve el relé correspondiente
22        end
23
24        function obj = set_relay(obj, name, relay)
25            % Actualiza el estado de un relé en el mapa
26            % name: Nombre del relé
27            % relay: Objeto Relay actualizado
28
29            obj.relays_map(name) = relay; % Actualiza el mapa con el nuevo estado del relé
30        end
31
32        function obj = turn_all_off(obj)
33            % Apaga todos los relés en el mapa
34            % Itera sobre cada relé en el mapa, apaga cada uno y actualiza el mapa
35
36            names = keys(obj.relays_map); % Obtiene las claves (nombres de los relés) del mapa
37            temp_map = containers.Map(); % Crea un mapa temporal para almacenar los estados actualizados
38
39            for i = 1:length(names)
40                relay = obj.relays_map(names{i}); % Obtiene el objeto Relay
41                relay = relay.turn_off(); % Apaga el relé
42                temp_map(names{i}) = relay; % Guarda el relé apagado en el mapa temporal
43            end
44
45            obj.relays_map = temp_map; % Actualiza el mapa principal con los nuevos estados
46        end
47    end
48

```

Figura D.10: Código implementado en MATLAB para control de relés parte 1.

```

49        function obj = turn_all_off_except(obj, exempt_relay)
50            % Apaga todos los relés excepto uno especificado
51            % exempt_relay: Nombre del relé que no debe apagarse
52
53            names = keys(obj.relays_map); % Obtiene las claves (nombres de los relés) del mapa
54            temp_map = containers.Map(); % Crea un mapa temporal para almacenar los estados actualizados
55
56            for i = 1:length(names)
57                relay = obj.relays_map(names{i}); % Obtiene el objeto Relay
58                if strcmp(names{i}, exempt_relay) == false
59                    % Si el nombre del relé actual no coincide con el relé exento, apágalo
60                    relay = relay.turn_off();
61                end
62                temp_map(names{i}) = relay; % Guarda el relé (apagado o no) en el mapa temporal
63            end
64
65            obj.relays_map = temp_map; % Actualiza el mapa principal con los nuevos estados
66        end
67
68        function obj = disable_all(obj)
69            % Deshabilita todos los relés en el mapa
70            % Apaga cada relé y desactiva su interacción en la interfaz gráfica
71
72            names = keys(obj.relays_map); % Obtiene las claves (nombres de los relés) del mapa
73            temp_map = containers.Map(); % Crea un mapa temporal para almacenar los estados actualizados
74
75            for i = 1:length(names)
76                relay = obj.relays_map(names{i}); % Obtiene el objeto Relay
77                relay = relay.turn_off(); % Apaga el relé
78                relay = relay.Enable('off'); % Desactiva el relé en la interfaz gráfica
79                temp_map(names{i}) = relay; % Guarda el relé actualizado en el mapa temporal
80            end
81
82            obj.relays_map = temp_map; % Actualiza el mapa principal con los nuevos estados
83        end
84
85        function obj = enable_all(obj)
86            % Habilita todos los relés en el mapa
87            % Permite la interacción con cada relé en la interfaz gráfica
88
89            temp_map = containers.Map(); % Crea un mapa temporal para almacenar los estados actualizados
90            names = keys(obj.relays_map); % Obtiene las claves (nombres de los relés) del mapa
91
92            for i = 1:length(names)
93                temp_map(names{i}) = obj.relays_map(names{i}).Enable('on'); % Habilita cada relé en la interfaz gráfica
94            end
95
96            obj.relays_map = temp_map; % Actualiza el mapa principal con los nuevos estados
97        end
98    end
99

```

Figura D.11: Código implementado en MATLAB para control de relés parte 2.

## D.3.2 App Designer

Código implementado en MATLAB en el App Designer.

```

1 classdef Interfaz_control_PCT_Auto < matlab.apps.AppBase
2
3     % Properties that correspond to app component
4     properties (Access = public)
183
184     properties (Access = public)
185
186         % Configuración general
187         reads_per_second = 8 % Número de lecturas por segundo
188         time_frame_plot = 120 % Duración en segundos para mostrar en los gráficos
189
190         % Conexiones seriales y dispositivos
191         s % Objeto para almacenar la conexión serial principal
192         a % Objeto para almacenar la conexión con Arduino
193
194         Tk4 % Objeto asociado a los controladores de temperatura Tk4
195         Keller % Objeto asociado al sensor de presión Keller
196
197         pressure_sensor % Objeto del sensor de presión
198         temperature_controller % Objeto para los controladores de temperatura
199
200         % Puertos y estados de los dispositivos
201         selectedPort_micro % Puerto seleccionado para el microcontrolador
202         selectedPort_presion % Puerto seleccionado para el sensor de presión
203         selectedPort_temperatura % Puerto seleccionado para los controladores de temperatura
204         switchState_micro % Estado del switch del microcontrolador
205         switchState_presion % Estado del switch del sensor de presión
206         switchState_temperatura % Estado del switch de los controladores de temperatura
207
208         % Actuadores y relés
209         Stop_Actuator % Actuator que controla el estado de parada
210         Relays_Controller % Objeto controlador para gestionar los relés
211         enable_relay % Indica si los relés están habilitados
212
213         % Bucle y procesamiento paralelo
214         loop % Variable para el control del bucle principal
215         pool % Objeto asociado al grupo de hilos para procesamiento paralelo
216
217         % Variables compartidas
218         sharedVars % Estructura o contenedor para almacenar variables compartidas entre procesos
219
220         % Timers para procesos de comunicaciones
221         timerTC % Timer para el control de temperatura
222         TC_Connected % Estado de conexión de los controladores de temperatura
223         timerPS % Timer para el sensor de presión
224         PS_Connected % Estado de conexión del sensor de presión
225
226         % Simulaciones y procesos
227         timerPSLoss % Timer para la simulación de pérdida de presión
228         ps_loss_sim % Estado de simulación de pérdida de presión
229
230         timerSystemPurge % Timer para el proceso de purga del sistema
231         ps_purge_sim % Estado de la simulación del proceso de purga
232         ps_purge_stamp % Marca de tiempo para el proceso de purga
233         purge_step % Etapa actual del proceso de purga
234         muestra % Contador o variable para datos de muestra
235
236         run_ps_loss_corrections % Correcciones para la simulación de pérdida de presión
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277

```

Figura D.12: Definición de propiedades parte 1.

```

238         testing_TC % Indicador para pruebas de los controladores de temperatura
239         chamber_target % Objetivo de temperatura para la cámara
240         oven_target % Objetivo de temperatura para el horno
241         timerTCtest % Timer para pruebas de control de temperatura
242         test_start_timestamp % Marca de tiempo de inicio de las pruebas
243
244         % Datos de presión
245         PressureData % Datos recopilados del sensor de presión
246         PressureLive % Última lectura en vivo de presión
247         PressureCounter % Contador de lecturas de presión
248         PressureLimsX % Límites del eje X para los gráficos de presión
249         PressureLimsY % Límites del eje Y para los gráficos de presión
250
251         % Datos del horno
252         OvenData % Datos recopilados del horno
253         OvenLive % Última lectura en vivo del horno
254         OvenCounter % Contador de lecturas del horno
255         OvenLims % Límites del gráfico del horno
256
257         % Datos de la cámara
258         ChamberData % Datos recopilados de la cámara
259         ChamberLive % Última lectura en vivo de la cámara
260         ChamberCounter % Contador de lecturas de la cámara
261         ChamberLims % Límites del gráfico de la cámara
262
263         % Configuración adicional
264         margin % Margen de tolerancia para los controles de presión
265
266         % Tiempos y fechas
267         date_time % Marca de tiempo actual
268
269         % Descarga de datos
270         download_data % Indicador para iniciar la descarga de datos
271         date_data % Fecha y hora asociada a los datos descargados
272
273         % Objetivos de procesos
274         purge_target % Objetivo de presión para el proceso de purga
275         ps_loss_target % Objetivo para la simulación de pérdida de presión
276
277     end

```

Figura D.13: Definición de propiedades parte 2.

```

278 % Callbacks that handle component events
279 methods (Access = private)
280
281 % Code that executes after component creation
282 function startupFcn(app)
283 % Agregue los scripts que hayan en esa carpeta
284 addpath('scripts\');
285 addpath('manuales\');
286 addpath('images\');
287 app.purge_target = 0;
288 app.ps_loss_target = 0;
289 app.margin = 0;
290 app.run_ps_loss_corrections = true;
291 app.date_data = datetime.empty;
292 app.date_time = datetime(2001,09,11);
293
294 app.PS_Connected = false;
295 app.ps_loss_sim = false;
296 app.ps_purge_sim = false;
297 app.purge_step = 1;
298 app.muestra = [];
299
300 app.testing_TC = false;
301 app.TC_Connected = false;
302 app.chamber_target = 0;
303 app.oven_target = 0;
304
305 app.PressureLimsX = [0, app.time_frame_plot];
306 app.OvenLims = [0, app.time_frame_plot];
307 app.ChamberLims = [0, app.time_frame_plot];
308
309
310
311
312 % Obtener el estado del Switch (On o Off) del microcontrolador
313 app.switchState_micro = app.OnOff_microcontrolador;
314 % Obtener el estado del Switch (On o Off) del sensor de presión
315 app.switchState_presion = app.OnOff_sensor_presion;
316 % Obtener el estado del Switch (On o Off) de los controladores de temperatura
317 app.switchState_temperatura = app.OnOff_temp_control;
318
319 % Crear referencias de botones para activarlos y desactivarlos
320 % facilmente
321 app.StopActuator = Toggled_Switch(app.StopActuatorsButton_valves_control, [1.00, 0.00, 0.00], [0.64, 0.08, 0.18]);
322
323 % Diccionario de relays
324 relays_map = containers.Map();
325 relays_map('Vacuum_Pump') = Relay(app, 'D8', {app.VacuumPumpButton_valves_control, app.VacuumPumpButton_pressure_sim, app.VacuumPumpButton_purge_sim});
326 relays_map('Cam_Oven_Valve') = Relay(app, 'D9', {app.CamOvenValveButton_valves_control, app.CamOvenValveButton_pressure_sim, app.CamOvenValveButton_purge_sim});
327 relays_map('Reserve_Valve') = Relay(app, 'D10', {app.ReserveValveButton_valves_control, app.ReserveValveButton_pressure_sim, app.ReserveValveButton_purge_sim});
328 relays_map('Vacuum_Valve') = Relay(app, 'D11', {app.VacuumValveButton_valves_control, app.VacuumValveButton_pressure_sim, app.VacuumValveButton_purge_sim});
329 relays_map('Hydrogen_Valve') = Relay(app, 'D12', {app.HydrogenValveButton_valves_control, app.HydrogenValveButton_pressure_sim, app.HydrogenValveButton_purge_sim});
330 relays_map('Environment_Valve') = Relay(app, 'D7', {app.EnvironmentValveButton_valves_control, app.EnvironmentValveButton_pressure_sim, app.EnvironmentValveButton_purge_sim});
331 relays_map('Enable_Relay') = Relay(app, 'D13', []);
332 app.Relays_Controller = RelaysController(relays_map);
333
334

```

Figura D.14: Inicialización de variables parte 1.

```

334 % Definición de variables iniciales
335 app.selectedPort_micro = app.Knob_microcontrolador.Value;
336 app.selectedPort_presion = app.Knob_sensor_presion.Value;
337 app.selectedPort_temperatura = app.Knob_temp_control.Value;
338
339 app.timerTC = timer('ExecutionMode','fixedRate','Period',1 / app.reads_per_second, 'TimerFcn', @(~, ~) timerTCFcn);
340 app.timerPS = timer('ExecutionMode','fixedRate','Period',1 / app.reads_per_second, 'TimerFcn', @(~, ~) timerPsFcn);
341 app.timerPSLoss = timer('ExecutionMode','fixedRate','Period',1 / app.reads_per_second, 'TimerFcn', @(~, ~) timerPSLossFcn);
342 app.timerSystemPurge = timer('ExecutionMode','fixedRate','Period',1 / app.reads_per_second, 'TimerFcn', @(~, ~) timerSystemPurgeFcn);
343 app.timerTctest = timer('ExecutionMode','fixedRate','Period',1 / app.reads_per_second, 'TimerFcn', @(~, ~) timerTctestFcn);
344
345 app.OvenCounter = 0;
346 app.PressureCounter = 0;
347 app.ChamberCounter = 0;
348
349 app.UIAxes_oven_temp_graphs.XLim = app.OvenLims;
350 app.UIAxes_camara_temp_graphs.XLim = app.ChamberLims;
351 app.UIAxes_presion_graphs.XLim = app.PressureLimsX;
352
353 app.STOP_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
354 app.STOP_purge_sim.Enable = "off";
355
356 % LAB
357 %pyenv('Version', 'C:\Users\Usuario\AppData\Local\Programs\Python\Python311\python.exe');
358 %st
359 % APARTA
360 pyenv('Version', 'C:\Users\Kevin\AppData\Local\Programs\Python\Python311\python.exe');
361
362 % Añade la carpeta de scripts al sistema de Python
363 addpathScripts = fullfile(pwd, 'scripts');
364 if count(py.sys.path, addpathScripts) == 0
365     insert(py.sys.path, int32(0), addpathScripts);
366 end
367
368 % Importar el módulo de Python
369 app.Tk4 = py.importlib.import_module('Tk4');
370 app.Keller = py.importlib.import_module('KellerPAA');
371
372 % Inicialización de timers
373 start(app.timerTC)
374 start(app.timerPS)
375 start(app.timerPSLoss)
376 start(app.timerSystemPurge)
377 start(app.timerTctest)
378

```

Figura D.15: Inicialización de variables parte 2.

```

379 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TIMER PRUEBA DE CONTROL DE TEMPERATURA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
380 function timerTcTestFcn()
381     if app.TC_Connected == true && app.testing_TC == true
382         oven_status = '';
383         chamber_status = '';
384
385         if app.chamber_target ~= app.ChamberLive
386             chamber_status = 'Estabilizando';
387         else
388             chamber_status = 'Estabilizado';
389         end
390
391         if app.oven_target ~= app.OvenLive
392             oven_status = 'Estabilizando';
393         else
394             oven_status = 'Estabilizado';
395         end
396
397         app.text_process_status_Temp_control.Text = ['Oven:', oven_status, ', ', newline, 'Chamber:', chamber_status];
398
399         app.UIAxes_oven_temp_Temp_control.YLim = [app.OvenLive - 50, app.OvenLive + 50];
400         app.UIAxes_oven_temp_Temp_control.XLim = app.OvenLims;
401
402         app.UIAxes_cam_temp_Temp_control.YLim = [app.ChamberLive - 50, app.ChamberLive + 50];
403         app.UIAxes_cam_temp_Temp_control.XLim = app.ChamberLims;
404
405
406         if ~isempty(app.OvenData) && rem(app.OvenCounter, app.reads_per_second) == 0
407             app.date_data = vertcat(app.date_data, datetime('now', 'Format', 'dd-MM-yyyy HH:mm:ss'));
408             plot(app.UIAxes_oven_temp_Temp_control, app.OvenData);
409             plot(app.UIAxes_cam_temp_Temp_control, app.ChamberData);
410         end
411
412         if hours(datetime('now') - app.test_start_timestamp) >= 12
413             app.testing_TC = false;
414             app.TC_Connected = false;
415             app.temperature_controller.set_value(uint8(1), uint8(0), uint8(0));
416             app.temperature_controller.set_value(uint8(2), uint8(0), uint8(0));
417
418             msgbox('Process Finished!', 'Success', 'help');
419
420             app.download_data = table(app.date_data, app.OvenData, app.ChamberData, 'VariableNames', {'Timestamp', 'Oven Temperature (°C)', 'Chamber Temperature (°C)'});
421
422             app.TC_Connected = true;
423             writetable(app.download_data, 'datos_temperatura.csv');
424         end
425     end
426 end
427

```

Figura D.16: Timer prueba de control de temperatura.

```

429 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TIMER CONTROLADORES TEMP %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
430 function timerTcFcn()
431     if app.TC_Connected == true
432
433         % CONTROLADOR DEL HORNO
434         app.OvenLive = double(app.temperature_controller.get_temperature(uint8(1)));
435         app.OvenCounter = app.OvenCounter + 1;
436
437         % CONTROLADOR DE LA CAMARA
438         app.ChamberLive = double(app.temperature_controller.get_temperature(uint8(2)));
439         app.ChamberCounter = app.ChamberCounter + 1;
440
441
442         if rem(app.OvenCounter, app.reads_per_second) == 0
443             app.OvenData(length(app.OvenData) + 1) = app.OvenLive;
444             app.UIAxes_oven_temp_graphs.YLim = [app.OvenLive - 50, app.OvenLive + 50];
445
446             if length(app.OvenData) > app.time_frame_plot
447                 app.OvenLims(1) = app.OvenLims(1) + 1;
448                 app.OvenLims(2) = app.OvenLims(2) + 1;
449                 app.UIAxes_oven_temp_graphs.XLim = app.OvenLims;
450             end
451
452             plot(app.UIAxes_oven_temp_graphs, app.OvenData);
453         end
454
455         if rem(app.ChamberCounter, app.reads_per_second) == 0
456             app.ChamberData(length(app.ChamberData) + 1) = app.ChamberLive;
457             app.UIAxes_camara_temp_graphs.YLim = [app.ChamberLive - 10, app.ChamberLive + 10];
458
459             if length(app.ChamberData) > app.time_frame_plot
460                 app.ChamberLims(1) = app.ChamberLims(1) + 1;
461                 app.ChamberLims(2) = app.ChamberLims(2) + 1;
462                 app.UIAxes_camara_temp_graphs.XLim = app.ChamberLims;
463             end
464
465             plot(app.UIAxes_camara_temp_graphs, app.ChamberData);
466         end
467
468         app.EditField_2.Value = double(app.ChamberLive);
469         app.EditField.Value = double(app.OvenLive);
470     end
471 end
472

```

Figura D.17: Timer para conexión con controladores de temperatura.

```

474 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TIMER SENSOR PRESION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
475 function timerPsFcn()
476     if app.PS_Connected == true
477         % TODO: DESCOMENTAR ESTA LINEA UNA VEZ QUE EL SENSOR
478         % ESTE FUNCIONANDO Y COMENTAR LA QUE ESTA
479         % INMEDIATAMENTE DEBAJO
480
481         %app.PressureLive = double(app.pressure_sensor.get_pressure());
482         app.PressureLive = app.Knob_pressurevalue_pressure_sim.Value;
483
484
485         app.PressureCounter = app.PressureCounter + 1;
486
487         if rem(app.PressureCounter, app.reads_per_second) == 0
488             app.PressureData(length(app.PressureData) + 1) = app.PressureLive;
489             app.PressureLimsY = [app.PressureLive - 200, app.PressureLive + 200];
490             app.UIAxes_presion_graphs.YLim = app.PressureLimsY;
491
492             if length(app.PressureData) > app.time_frame_plot
493                 app.PressureLimsX(1) = (length(app.PressureData) - app.time_frame_plot);
494                 app.PressureLimsX(2) = app.time_frame_plot + (length(app.PressureData) - app.time_frame_plot);
495                 app.UIAxes_presion_graphs.XLim = app.PressureLimsX;
496
497             end
498
499             plot(app.UIAxes_presion_graphs, app.PressureData)
500
501         end
502
503         app.EditField_3.Value = app.PressureLive;
504     end
505 end
506 ...

```

Figura D.18: Timer para conexión con sensor de presión.

```

507 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TIMER PRESSURE LOSS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
508 function timerPSLossFcn()
509     if app.PS_Connected == true && app.ps_loss_sim == true && strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
510
511         % PLOTEAR
512         if ~isempty(app.PressureData) && rem(app.PressureCounter, app.reads_per_second) == 0
513             app.muestra(length(app.PressureData)) = length(app.PressureData);
514             datos = [app.muestra; app.PressureData];
515             app.UITable_pressure_sim.Data = datos;
516
517             app.UIAxes_pressure_sim.XLim = app.PressureLimsX;
518             app.UIAxes_pressure_sim.YLim = app.PressureLimsY;
519             plot(app.UIAxes_pressure_sim, app.PressureData);
520             app.date_data = vertcat(app.date_data, datetime('now', 'Format', 'dd-MM-yyyy HH:mm:ss'));
521         end
522     end
523 end

```

Figura D.19: Timer para el proceso de prueba de pérdidas de presión parte 1.

```

524 % ESTOY SOBRE AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
525 if app.PressureLive > 102 && app.ps_loss_target <= 101.3 && app.run_ps_loss_corrections == true
526     % Apagar todos los Relays
527     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Environment_Valve');
528
529     % Abrir válvula medio ambiente
530     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
531     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
532
533     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
534     app.date_time = datetime('now');
535     % ESTOY EN AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
536 elseif app.ps_loss_target <= 101.3 && app.PressureLive == 0 && app.PressureLive < 102 && app.run_ps_loss_corrections == true
537     % Apagar todos los Relays
538     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Vacuum_Pump');
539
540     % hacer vacio
541     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_on();
542     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
543
544     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').turn_on();
545     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Pump', relay);
546
547     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
548     app.date_time = datetime('now');
549     % ESTOY SOBRE EL TARGET, QUIERO BAJAR
550 elseif app.PressureLive > (app.ps_loss_target + app.margin) && app.run_ps_loss_corrections == true
551     % Apagar todos los Relays
552     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Environment_Valve');
553
554     % Abrir válvula medio ambiente
555     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
556     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
557
558     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
559     app.date_time = datetime('now');
560     % ESTOY BAJO EL TARGET, QUIERO SUBIR
561 elseif app.PressureLive < (app.ps_loss_target - app.margin) && app.run_ps_loss_corrections == true
562     % Apagar todos los Relays
563     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Hydrogen_Valve');
564
565     % Abrir válvula de hidrógeno
566     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_on();
567     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
568
569     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
570     app.date_time = datetime('now');
571     % ESTOY ESTABILIZADO
572 elseif app.run_ps_loss_corrections == true
573     % Apagar todos los Relays
574     % Estado Normal
575     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
576     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Estabilizado";
577 end
578
579 if seconds(datetime('now') - app.date_time) > 5
580     app.run_ps_loss_corrections = false;
581     app.text_process_status_Pressure_Loss_pressure_sim.Text = "Valvulas Deshabilitadas";
582 end
583 end
584 end

```

Figura D.20: Timer para el proceso de prueba de pérdidas de presión parte 2.

```

586 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TIMER SYSTEM PURGE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
587 function timerSystemPurgeFcn()
588     if app.PS_Connected == true && app.ps_purge_sim == true && strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
589
590         % PLOTEAR
591         if ~isempty(app.PressureData) && rem(app.PressureCounter, app.reads_per_second) == 0
592             app.muestra(length(app.PressureData)) = length(app.PressureData);
593             datos = [app.muestra;app.PressureData];
594             app.UItable_purge_sim.Data = datos;
595
596             app.UIAxes_purge_sim.XLim = app.PressureLimitsX;
597             app.UIAxes_purge_sim.YLim = app.PressureLimitsY;
598             plot(app.UIAxes_purge_sim, app.PressureData);
599             app.date_data = vertcat(app.date_data, datetime('now', 'Format', 'dd-MM-yyyy HH:mm:ss'));
600
601         end
602
603         % PRIMER PASO, LLEGAR A VACIO
604         if app.purge_step == 1
605             % ESTOY SOBRE AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
606             if app.PressureLive > 102
607                 % Apagar todos los Relays
608                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Environment_Valve');
609
610                 % Abrir válvula medio ambiente
611                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
612                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
613
614                 app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
615                 app.date_time = datetime(2001,09,11);
616
617             % ESTOY EN AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
618             elseif app.PressureLive < 102
619
620                 if app.date_time == datetime(2001,09,11)
621                     % hacer vacio
622                     % Apagar todos los Relays
623                     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
624                     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_on();
625                     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
626
627                     relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').turn_on();
628                     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Pump', relay);
629                     app.date_time = datetime('now');
630                     app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
631                 end
632
633                 if seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 15
634                     app.text_process_status_purge_sim.Text = "Ciclo 1 de vacio completado"; % Gris
635                 end
636
637                 if seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 17
638                     app.purge_step = 2;
639                     app.date_time = datetime(2001, 09, 11);
640                 end
641             end
642         end
643     end
644 end

```

Figura D.21: Timer para proceso de purga del sistema parte 1.

```

647 % SEGUNDO PASO, IR A PRESION
648 if app.purge_step == 2
649     pressure_stabilized = app.PressureLive > (app.purge_target - app.margin) && app.PressureLive < (app.purge_target + app.margin);
650
651     % ESTOY SOBRE EL TARGET, QUIERO BAJAR
652     if app.PressureLive > (app.purge_target + app.margin)
653         % Apagar todos los Relays
654         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Environment_Valve');
655
656         % Abrir válvula medio ambiente
657         relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
658         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
659
660         app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
661
662     % ESTOY BAJO EL TARGET, QUIERO SUBIR
663     elseif app.PressureLive < (app.purge_target - app.margin)
664         % Apagar todos los Relays
665         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Hydrogen_Valve');
666
667         % Abrir válvula de hidrógeno
668         relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_on();
669         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
670
671         app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
672
673     % ESTOY ESTABILIZADO
674     elseif pressure_stabilized == true
675         % Apagar todos los Relays
676         % Estado Normal
677         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
678
679     end
680
681     % ESPERANDO A QUE PASEN 5 SEGUNDOS EN LA
682     % PRESION SOLICITADA
683     if pressure_stabilized == false
684         % Actualizar app.datetime con el tiempo actual
685         app.date_time = datetime('now');
686
687         % EL TIEMPO TRANSCURRIDO ES IGUAL O MAYOR A 5 SEGUNDOS
688         elseif seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 5
689
690             % Indicar el cambio de estado
691             app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizado, Paso 2 completado. Preparando presión"; % Verde
692
693         end
694
695         if seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 7
696             app.purge_step = 3;
697             app.date_time = datetime(2001, 09, 11);
698         end
699     end
700 end

```

Figura D.22: Timer para proceso de purga del sistema parte 2.

```

701 % TERCER PASO, LLEGAR A VACIO
702 if app.purge_step == 3
703     % ESTOY SOBRE AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
704     if app.PressureLive > 102
705         % Apagar todos los Relays
706         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off_except('Environment_Valve');
707
708         % Abrir válvula medio ambiente
709         relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
710         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
711
712         app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
713         app.date_time = datetime(2001,09,11);
714         % ESTOY EN AMBIENTE Y QUIERO IR A VACIO
715     elseif app.PressureLive < 102
716
717         if app.date_time == datetime(2001,09,11)
718             % hacer vacio
719             % Apagar todos los Relays
720             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
721             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_on();
722             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
723
724             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').turn_on();
725             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Pump', relay);
726             app.date_time = datetime('now');
727             app.text_process_status_purge_sim.Text = "Estabilizando"; % Gris
728         end
729
730
731         if seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 15
732             app.text_process_status_purge_sim.Text = "Ciclo 2 de vacio completado"; % Gris
733         end
734
735
736         if seconds(datetime('now') - app.date_time) >= 17
737             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
738             app.text_process_status_purge_sim.Text = "Purga del sistema finalizado"; % Gris
739             app.date_time = datetime(2001, 09, 11);
740             app.purge_step = 4;
741             app.PS_connected = false;
742         end
743     end
744 end
745 end
746 end
747 end
748 end
749

```

Figura D.23: Timer para proceso de purga del sistema parte 3.

```

761 % Value changed function: OnOff_microcontrolador
762 function OnOff_microcontroladorValueChanged(app, event)
763     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
764         % Validar que el puerto seleccionado sea válido
765         if isempty(app.selectedPort_micro) || ~ischar(app.selectedPort_micro)
766             app.switchState_micro.Value = 'Off';
767             msgbox('Please select a valid COM port.', 'Port Error', 'error');
768             return;
769         end
770         % Intentar conectar al puerto seleccionado
771         try
772             %app.s = serialport(app.selectedPort_micro, 9600);
773             app.s = arduino(app.selectedPort_micro, 'Uno');
774             % Si la conexión es exitosa, cambiar el color de la lámpara a verde
775             app.Lamp_microcontrolador.Color = [0.39, 0.83, 0.07]; % Verde (conectado)
776             % Mostrar mensaje de éxito
777             msgbox('Connection Successful!', 'Success', 'help');
778             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.enable_all();
779             app.Stop_Actuator = app.Stop_Actuator.turn_off();
780             %relay = app.Relays_Controller.get_relay('Enable_Relay').turn_on();
781             %app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Enable_Relay', relay);
782
783         catch ME
784             % Si no se puede conectar, apagar el Switch y cambiar el color de la lámpara a rojo
785             app.Lamp_microcontrolador.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo
786             app.switchState_micro.Value = 'Off';
787             % Mostrar mensaje de error con detalles específicos
788             msgbox([ME.message], 'Connection Error', 'error');
789         end
790     else
791         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
792         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
793         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.disable_all();
794         app.s = 0;
795         app.Stop_Actuator = app.Stop_Actuator.turn_off();
796
797         app.Lamp_microcontrolador.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo (desconectado)
798     end
799 end

```

Figura D.24: Programación Switch para conexión con microcontrolador.

```

1186 % Value changed function: OnOff_sensor_presion
1187 function OnOff_sensor_presionValueChanged2(app, event)
1188     if strcmp(app.switchState_presion.Value, 'On')
1189         % Validar que el puerto seleccionado sea válido
1190         if isempty(app.selectedPort_presion) || ~ischar(app.selectedPort_presion)
1191             app.switchState_presion.Value = 'Off';
1192             msgbox('Please select a valid COM port.', 'Port Error', 'error');
1193             return;
1194         end
1195         % Intentar conectar al puerto seleccionado
1196         try
1197             % TODO: DESCOMENTAR ESTA LINEA UNA VEZ QUE EL SENSOR
1198             % ESTE FUNCIONANDO
1199
1200             % app.pressure_sensor = app.Keller.KellerPAA(app.selectedPort_presion);
1201             app.PS_Connected = true;
1202
1203             % Si la conexión es exitosa, cambiar el color de la lámpara a verde
1204             app.Lamp_sensor_presion.Color = [0.39, 0.83, 0.07]; % Verde (conectado)
1205             % Mostrar mensaje de éxito
1206             msgbox('Connection Successful!', 'Success', 'help');
1207
1208
1209         catch ME
1210             % Si no se puede conectar, apagar el Switch y cambiar el color de la lámpara a rojo
1211             app.PS_Connected = false;
1212             %app.pressure_sensor.close();
1213             %app.pressure_sensor.close();
1214
1215             app.Lamp_sensor_presion.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo (error de conexión)
1216             app.switchState_presion.Value = 'Off';
1217             % Mostrar mensaje de error con detalles específicos
1218             msgbox([ME.message], 'Connection Error', 'error');
1219
1220         end
1221     else
1222         app.PS_Connected = false;
1223         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1224         % app.pressure_sensor.close();
1225         app.Lamp_sensor_presion.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo (error de conexión)
1226         app.switchState_presion.Value = 'Off'; % Rojo (desconectado)
1227
1228     end
1229 end

```

Figura D.25: Programación Switch para conexión con sensor de presión.

```

1236 % Value changed function: OnOff_temp_control
1237 function OnOff_temp_controlValueChanged(app, event)
1238     if strcmp(app.switchState_temperatura.Value, 'On')
1239         % Validar que el puerto seleccionado sea válido
1240         if isempty(app.selectedPort_temperatura) || ~ischar(app.selectedPort_temperatura)
1241             app.switchState_temperatura.Value = 'Off';
1242             msgbox('Please select a valid COM port.', 'Port Error', 'error');
1243             return;
1244         end
1245         % Intentar conectar al puerto seleccionado
1246         try
1247             app.temperature_controller = app.Tk4.Tk4(app.selectedPort_temperatura);
1248             app.temperature_controller.start(uint8(1));
1249             app.temperature_controller.start(uint8(2));
1250             app.TC_Connected = true;
1251
1252             % Si la conexión es exitosa, cambiar el color de la lámpara a verde
1253             app.Lamp_temp_control.Color = [0.39, 0.83, 0.07]; % Verde (conectado)
1254             % Mostrar mensaje de éxito
1255             msgbox('Connection Successful!', 'Success', 'help');
1256
1257
1258         catch ME
1259             % Si no se puede conectar, apagar el Switch y cambiar el color de la lámpara a rojo
1260             delete(app.temperature_controller);
1261             app.TC_Connected = false;
1262
1263             app.Lamp_temp_control.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo (error de conexión)
1264             app.switchState_temperatura.Value = 'Off';
1265             % Mostrar mensaje de error con detalles específicos
1266             msgbox([ME.message], 'Connection Error', 'error');
1267
1268         end
1269     else
1270         app.TC_Connected = false;
1271         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1272         app.temperature_controller.close();
1273
1274         app.Lamp_temp_control.Color = [0.84, 0.05, 0.20]; % Rojo (error de conexión)
1275         app.switchState_temperatura.Value = 'Off';
1276
1277     end
1277 end

```

Figura D.26: Programación Switch para conexión con controladores de temperatura.

```

801 % Value changed function: Knob_microcontrolador
802 function Knob_microcontroladorValueChanged(app, event)
803     % Obtener el valor del Knob
804     app.selectedPort_micro = app.Knob_microcontrolador.Value;
805 end

```

Figura D.27: Programación de perilla de selección de puerto de conexión con microcontrolador.

```

1231 | % Value changed function: Knob_sensor_presion
1232 | function Knob_sensor_presionValueChanged2(app, event)
1233 |     app.selectedPort_presion = app.Knob_sensor_presion.Value;
1234 | end
-----

```

Figura D.28: Programación de perilla de selección de puerto de conexión con sensor de presión.

```

1278 | % Value changed function: Knob_temp_control
1279 | function Knob_temp_controlValueChanged(app, event)
1280 |     app.selectedPort_temperatura = app.Knob_temp_control.Value;
1281 |
1282 | end
-----

```

Figura D.29: Programación de perilla de selección de puerto de conexión con controladores de temperatura.

```

1039 | % Value changed function: StopActuatorsButton_valves_control
1040 | function StopActuatorsButton_valves_controlValueChanged(app, event)
1041 |     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
1042 |     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
1043 |
1044 |         if app.Stop_Actuator.get_state() == 0
1045 |             % Apagar todos los actuadores
1046 |             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.disable_all();
1047 |
1048 |             % Encender la válvula
1049 |             app.Stop_Actuator = app.Stop_Actuator.turn_on();
1050 |         else
1051 |             % Apagar la válvula
1052 |             app.Stop_Actuator = app.Stop_Actuator.turn_off(); % Botón apagado
1053 |
1054 |             % Habilitar todos los actuadores
1055 |             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.enable_all();
1056 |             %relay = app.Relays_Controller.get_relay('Enable_Relay').turn_on();
1057 |             %app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Enable_Relay', relay);
1058 |
1059 |         end
1060 |     else
1061 |         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1062 |         app.s = 0;
1063 |     end
1064 | end
-----

```

Figura D.30: Programación del botón de Stop de la pestaña de Valves Control en Testing.

```

--- |
872 | % Value changed function: CamOvenValveButton_valves_control
873 | function CamOvenValveButton_valves_controlValueChanged(app, event)
874 |     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
875 |
876 |     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
877 |     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
878 |         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
879 |         if value_stop_actuators == false
880 |             if app.Relays_Controller.get_relay('Cam_Oven_Valve').get_state() == 0
881 |                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Cam_Oven_Valve').turn_on();
882 |                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Cam_Oven_Valve', relay);
883 |                 % Enviar comando para cerrar válvula
884 |             else
885 |                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Cam_Oven_Valve').turn_off();
886 |                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Cam_Oven_Valve', relay);
887 |             end
888 |         end
889 |     else
890 |         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
891 |         app.s = 0;
892 |     end
893 | end
894 |
895 | % Value changed function: ReserveValveButton_valves_control
896 | function ReserveValveButton_valves_controlValueChanged(app, event)
897 |     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
898 |
899 |     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
900 |     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
901 |         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
902 |         if value_stop_actuators == false
903 |             if app.Relays_Controller.get_relay('Reserve_Valve').get_state() == 0
904 |                 % Encender la válvula
905 |                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Reserve_Valve').turn_on();
906 |                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Reserve_Valve', relay);
907 |             else
908 |                 % Apagar la válvula
909 |                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Reserve_Valve').turn_off();
910 |                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Reserve_Valve', relay);
911 |             end
912 |         end
913 |     else
914 |         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
915 |         app.s = 0;
916 |     end
917 | end
--- |

```

Figura D.31: Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 1.

```

919 % Value changed function: VacuumValveButton_valves_control
920 function VacuumValveButton_valves_controlValueChanged(app, event)
921     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
922
923     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
924     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
925         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
926         if value_stop_actuators == false
927             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_off();
928             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
929
930             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_off();
931             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
932             if app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').get_state() == 0
933                 %pause(1);
934                 % Encender la válvula
935                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_on();
936                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
937             else
938                 % Apagar la válvula
939                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_off();
940                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
941             end
942         end
943     else
944         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
945         app.s = 0;
946     end
947 end
948
949 % Value changed function: HydrogenValveButton_valves_control
950 function HydrogenValveButton_valves_controlValueChanged(app, event)
951     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
952
953     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
954     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
955         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
956         if value_stop_actuators == false
957             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_off();
958             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
959
960             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_off();
961             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
962             if app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').get_state() == 0
963                 %pause(1);
964                 % Encender la válvula
965                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_on();
966                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
967             else
968                 % Apagar la válvula
969                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_off();
970                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
971             end
972         end
973     else
974         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
975         app.s = 0;
976     end
977 end
978

```

Figura D.32: Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 2.

```

980 % Value changed function: EnvironmentValveButton_valves_control
981 function EnvironmentValveButton_valves_controlValueChanged(app, event)
982     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
983
984     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
985     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
986         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
987         if value_stop_actuators == false
988             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Valve').turn_off();
989             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Valve', relay);
990
991             relay = app.Relays_Controller.get_relay('Hydrogen_Valve').turn_off();
992             app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Hydrogen_Valve', relay);
993             if app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').get_state() == 0
994                 %pause(1);
995                 % Encender la válvula
996                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_on();
997                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
998             else
999                 % Apagar la válvula
1000                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Environment_Valve').turn_off();
1001                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Environment_Valve', relay);
1002             end
1003         end
1004     else
1005         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1006         app.s = 0;
1007     end
1008 end
1009
1010 % Value changed function: VacuumPumpButton_valves_control
1011 function VacuumPumpButton_valves_controlValueChanged(app, event)
1012     value_stop_actuators = app.StopActuatorsButton_valves_control.Value;
1013
1014     % VALIDAR SI ESTÁ CONECTADO AL MICROCONTROLADOR
1015     if strcmp(app.switchState_micro.Value, 'On')
1016         % VALIDAR SI EL BOTÓN DE STOP NO ESTÁ ENCENDIDO
1017         if value_stop_actuators == false
1018             if app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').get_state() == 0
1019                 % Encender la válvula
1020                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').turn_on();
1021                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Pump', relay);
1022             else
1023                 % Apagar la válvula
1024                 relay = app.Relays_Controller.get_relay('Vacuum_Pump').turn_off();
1025                 app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.set_relay('Vacuum_Pump', relay);
1026             end
1027         end
1028     else
1029         % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1030         app.s = 0;
1031     end
1032 end
1033
1034 % Si el Switch está apagado, desconectar el Arduino
1035 app.s = 0;
1036 end
1037

```

Figura D.33: Programación botones de pestaña Valves Control de Testing parte 3.

```

1451 % Value changed function: set_oven_temp_Temp_control
1452 function set_oven_temp_Temp_controlValueChanged(app, event)
1453     value = app.set_oven_temp_Temp_control.Value;
1454
1455     if value >= 20 && value <= 400
1456         app.oven_target = uint8(str2double(value));
1457     else
1458         app.set_oven_temp_Temp_control.Value = 0;
1459         msgbox('El valor de temperatura del horno debe estar entre 20°C y 400°C')
1460     end
1461 end
1462
1463 % Value changed function: set_chamber_temp_Temp_control
1464 function set_chamber_temp_Temp_controlValueChanged(app, event)
1465     value = app.set_chamber_temp_Temp_control.Value;
1466
1467     if value >= 20 && value <= 40
1468         app.chamber_target = uint8(str2double(value));
1469     else
1470         app.set_chamber_temp_Temp_control.Value = 0;
1471         msgbox('El valor de temperatura de la cámara debe estar entre 20°C y 40°C')
1472     end
1473 end

```

Figura D.34: Validación de entrada de valores de la pestaña de Temperature Control.

```

1475 % Button pushed function: START_Temp_control
1476 function START_Temp_controlButtonPushed(app, event)
1477     if app.oven_target ~= 0 && app.chamber_target ~= 0
1478         app.temperature_controller.set_value(uint8(1), app.oven_target, uint8(0));
1479         app.temperature_controller.set_value(uint8(2), app.chamber_target, uint8(0));
1480         app.date_data = datetime.empty;
1481
1482         app.TC_Connected = false;
1483         pause(0.2);
1484
1485         app.OvenData = [];
1486         app.OvenCounter = 0;
1487         app.ChamberData = [];
1488         app.ChamberCounter = 0;
1489
1490         app.ChamberLims(1) = 0;
1491         app.ChamberLims(2) = app.time_frame_plot;
1492
1493         app.OvenLims(1) = 0;
1494         app.OvenLims(2) = app.time_frame_plot;
1495
1496         pause(0.2)
1497         app.TC_Connected = true;
1498
1499         app.testing_TC = true;
1500         app.test_start_timestamp = datetime('now');
1501     end
1502 end
1503
1504

```

Figura D.35: Programación de botón Start de Temperature Control.

```

1535 % Button pushed function: STOP_Temp_control
1536 function STOP_Temp_controlButtonPushed(app, event)
1537     app.testing_TC = false;
1538     app.TC_Connected = false;
1539     app.temperature_controller.set_value(uint8(1), uint8(0), uint8(0));
1540     app.temperature_controller.set_value(uint8(2), uint8(0), uint8(0));
1541
1542     app.download_data = table(app.date_data, app.OvenData, app.ChamberData, 'VariableNames', {'Timestamp', 'Oven Temperature (°C)', 'Chamber Temperature (°C)'});
1543     app.TC_Connected = true;
1544 end
1545
1546 % Button pushed function: Downloaddata_Temp_control
1547 function Downloaddata_Temp_controlButtonPushed(app, event)
1548     writetable(app.download_data, 'datos_temperatura.csv');
1549     msgbox('Data downloaded successfully!', 'Success', 'Notification');
1550 end
1551

```

Figura D.36: Programación de botones de Stop y Download data de Temperature Control.

```

1558 % Value changed function: Setpointvalue_pressure_sim
1559 function Setpointvalue_pressure_simValueChanged(app, event)
1560     value = app.Setpointvalue_pressure_sim.Value;
1561     if value >= 1000 && value <= 3000
1562         app.ps_loss_target = value;
1563     else
1564         app.Setpointvalue_pressure_sim.Value = 0;
1565         msgbox('El valor ingresado debe estar entre 1000 kPa y 3000 kPa');
1566     end
1567 end
1568
1569 % Value changed function: Setpointvalue_purge_sim
1570 function Setpointvalue_purge_simValueChanged(app, event)
1571     value = app.Setpointvalue_purge_sim.Value;
1572     if value >= 1000 && value <= 3000
1573         app.purge_target = value;
1574     else
1575         app.Setpointvalue_purge_sim.Value = 0;
1576         msgbox('El valor ingresado debe estar entre 1000 kPa y 3000 kPa');
1577     end
1578 end
1579
1580

```

Figura D.37: Validación de entrada de datos de presión de las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim.

```

1506 % Value changed function: histeresis_pressure_sim
1507 function histeresis_pressure_simValueChanged(app, event)
1508     value = app.histeresis_pressure_sim.Value;
1509
1510     if value >= 50 && value <= 500
1511         app.margin = value;
1512         app.histeresis_purge_sim.Value = value;
1513         app.histeresis_pressure_sim.Value = value;
1514     else
1515         app.histeresis_pressure_sim.Value = 0;
1516         app.histeresis_purge_sim.Value = 0;
1517         msgbox('El valor de histeresis debe estar entre 50 y 500')
1518     end
1519 end
1520
1521 % Value changed function: histeresis_purge_sim
1522 function histeresis_purge_simValueChanged(app, event)
1523     value = app.histeresis_purge_sim.Value;
1524     if value >= 50 && value <= 500
1525         app.margin = value;
1526         app.histeresis_purge_sim.Value = value;
1527         app.histeresis_pressure_sim.Value = value;
1528     else
1529         app.histeresis_pressure_sim.Value = 0;
1530         app.histeresis_purge_sim.Value = 0;
1531         msgbox('El valor de histeresis debe estar entre 50 y 500')
1532     end
1533 end
1534

```

Figura D.38: Validación de entrada de datos de histéresis de las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim.

```

1327 % Button pushed function: START_Pressure_Loss_pressure_sim
1328 function START_Pressure_Loss_pressure_simButtonPushed(app, event)
1329     % APAGAR TODOS LOS RELAYS
1330     if app.ps_loss_target ~= 0 && app.margin ~= 0
1331         app.date_time = datetime(2001,09,11);
1332         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.disable_all();
1333         app.run_ps_loss_corrections = true;
1334         app.START_purge_sim.Enable = "off";
1335         app.STOP_purge_sim.Enable = "off";
1336         app.STOP_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "on";
1337         app.START_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
1338
1339         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
1340         app.muestra = [];
1341         app.date_data = datetime.empty;
1342         app.PS_Connected = false;
1343         pause(0.2)
1344         app.PressureData = [];
1345         app.PressureCounter = 0;
1346
1347         app.PressureLimsX(1) = 0;
1348         app.PressureLimsX(2) = app.time_frame_plot;
1349
1350         pause(0.2)
1351         app.PS_Connected = true;
1352
1353         app.ps_loss_sim = true;
1354     else
1355         msgbox('Ingrese un valor numérico en los cuadros de texto')
1356     end
1357
1358 end
1359
1360
1361 % Button pushed function: STOP_Pressure_Loss_pressure_sim
1362 function STOP_Pressure_Loss_pressure_simButtonPushed(app, event)
1363     app.ps_loss_sim = false;
1364     app.STOP_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
1365     app.START_purge_sim.Enable = "on";
1366     app.STOP_purge_sim.Enable = "off";
1367     app.START_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "on";
1368
1369     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.enable_all();
1370
1371     % APAGAR TODOS LOS RELAYS
1372     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
1373     data = app.UITable_pressure_sim.Data(:, 2);
1374     app.download_data = table(app.date_data, data, 'VariableNames', {'Timestamp', 'Pressure Value (kPa)'});
1375 end
1376
1377 % Button pushed function: Downloaddata_Pressure_Loss_pressure_sim
1378 function Downloaddata_Pressure_Loss_pressure_simButtonPushed(app, event)
1379     writetable(app.download_data, 'datos_pressure_loss.csv');
1380     msgbox('Data downloaded succesfully!', 'Success', 'Notification');
1381 end

```

Figura D.39: Programación de los botnes de Start, Stop y Download data de la pestaña de Pressure Loss Sim.

```

1383 % Button pushed function: Downloaddata_purge_sim
1384 function Downloaddata_purge_simButtonPushed(app, event)
1385     writetable(app.download_data, 'datos_system_purge.csv');
1386     msgbox('Data downloaded succesfully!', 'Success', 'Notification');
1387 end
1388
1389 % Button pushed function: STOP_purge_sim
1390 function STOP_purge_simButtonPushed(app, event)
1391     app.ps_purge_sim = false;
1392
1393     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.enable_all();
1394
1395     app.STOP_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
1396     app.START_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "on";
1397     app.STOP_purge_sim.Enable = "off";
1398     app.START_purge_sim.Enable = "on";
1399
1400     % APAGAR TODOS LOS RELAYS
1401     app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
1402
1403     data = app.UITable_purge_sim.Data(:, 2);
1404     app.download_data = table(app.date_data, data, 'VariableNames', {'Timestamp', 'Pressure Value (kPa)'});
1405 end
1406
1407 % Button pushed function: START_purge_sim
1408 function START_purge_simButtonPushed(app, event)
1409     if app.purge_target ~= 0 && app.margin ~= 0
1410         app.date_time = datetime(2001,09,11);
1411
1412         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.disable_all();
1413
1414         app.STOP_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
1415         app.START_Pressure_Loss_pressure_sim.Enable = "off";
1416         app.STOP_purge_sim.Enable = "on";
1417         app.START_purge_sim.Enable = "off";
1418
1419         % APAGAR TODOS LOS RELAYS
1420         app.Relays_Controller = app.Relays_Controller.turn_all_off();
1421
1422         % INICIALIZACION DE VARIABLES PARA EL PROCESO
1423         app.muestra = [];
1424         app.PS_Connected = false;
1425         pause(0.2)
1426         app.date_data = datetime.empty;
1427         app.PressureData = [];
1428         app.PressureCounter = 0;
1429
1430         app.PressureLimsX(1) = 0;
1431         app.PressureLimsX(2) = app.time_frame_plot;
1432         pause(0.2)
1433         app.PS_Connected = true;
1434
1435         app.purge_step = 1;
1436         app.ps_purge_sim = true;
1437     else
1438         msgbox('Ingrese un valor numérico en los cuadros de texto')
1439     end
1440 end
1441

```

Figura D.40: Programación de los botnes de Start, Stop y Download data de la pestaña de System Purge Sim.

```

1318 % Value changing function: Knob_pressure_sim
1319 function Knob_pressure_simValueChanging(app, event)
1320     changingValue = event.Value;
1321     app.Knob_pressurevalue_pressure_sim.Value = changingValue;
1322
1323     app.Knob_value_purge_sim.Value = changingValue;
1324     app.Knob_purge_sim.Value = changingValue;
1325 end
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342 % Value changing function: Knob_purge_sim
1343 function Knob_purge_simValueChanging(app, event)
1344     changingValue1 = event.Value;
1345     app.Knob_value_purge_sim.Value = changingValue1;
1346
1347     app.Knob_pressurevalue_pressure_sim.Value = changingValue1;
1348     app.Knob_pressure_sim.Value = changingValue1;
1349 end

```

Figura D.41: Programación de perillas de selección para simulación de presión en las pestañas de Pressure Loss Sim y System Purge Sim.

```
1146 % Menu selected function: CommunicationManualMenu
1147 function CommunicationManualMenuSelected(app, event)
1148     open("Controladores_temp_communication_manual.pdf");
1149 end
1150
1151 % Menu selected function: GeneralDatasheetMenu
1152 function GeneralDatasheetMenuSelected(app, event)
1153     open("Controladores_temp_general_datasheet.pdf");
1154 end
1155
1156 % Menu selected function: TechnicalDatasheetMenu
1157 function TechnicalDatasheetMenuSelected(app, event)
1158     open("Controladores_temp_tech_datasheet.pdf");
1159 end
1160
1161 % Menu selected function: UserManualMenu
1162 function UserManualMenuSelected(app, event)
1163     open("Controladores_temp_user_manual.pdf");
1164 end
1165
1166 % Menu selected function: CommunicationProtocolManualMenu
1167 function CommunicationProtocolManualMenuSelected(app, event)
1168     open("Sensor_presion_communication_protocol.pdf");
1169 end
1170
1171 % Menu selected function: DatasheetMenu
1172 function DatasheetMenuSelected(app, event)
1173     open("Sensor_presion_datasheet.pdf");
1174 end
1175
1176 % Menu selected function: SolenoidDatasheetMenu
1177 function SolenoidDatasheetMenuSelected(app, event)
1178     open("Manifold_solenoid.pdf");
1179 end
1180
1181 % Menu selected function: ValvesDatasheetMenu
1182 function ValvesDatasheetMenuSelected(app, event)
1183     open("Manifold_valves_datasheet.pdf");
1184 end
```

**Figura D.42:** Programación de opciones para acceder a las hojas de especificaciones de los dispositivos en el menú de ayuda.

```
832 % Menu selected function: CloseAppMenu
833 function CloseAppMenuSelected(app, event)
834     close(app.Interfaz_Control)
835 end
```

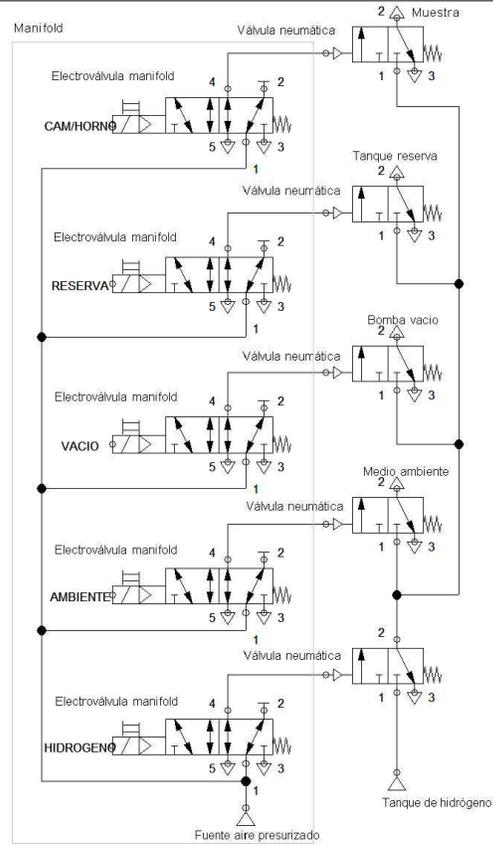
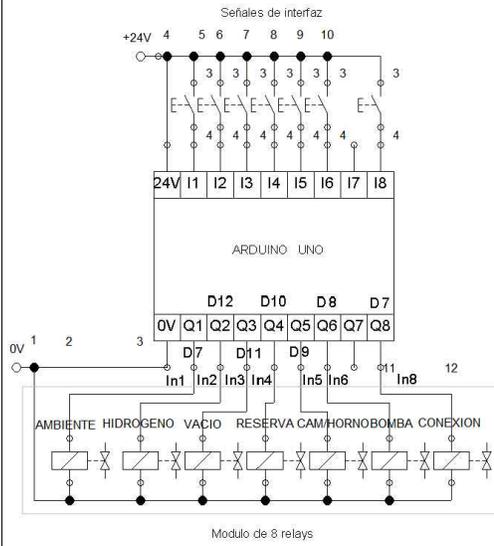
**Figura D.43:** Programación de opción de cierre de aplicación en el menú de ayuda.

# Apéndice E

## Planos

## **E.1 Conexiones válvulas**

Por limitaciones del software en el que fue creado el plano, el Arduino se representa mediante un controlador. Para ver el diagrama de conexiones de los pines, referirse al plano del microcontrolador.

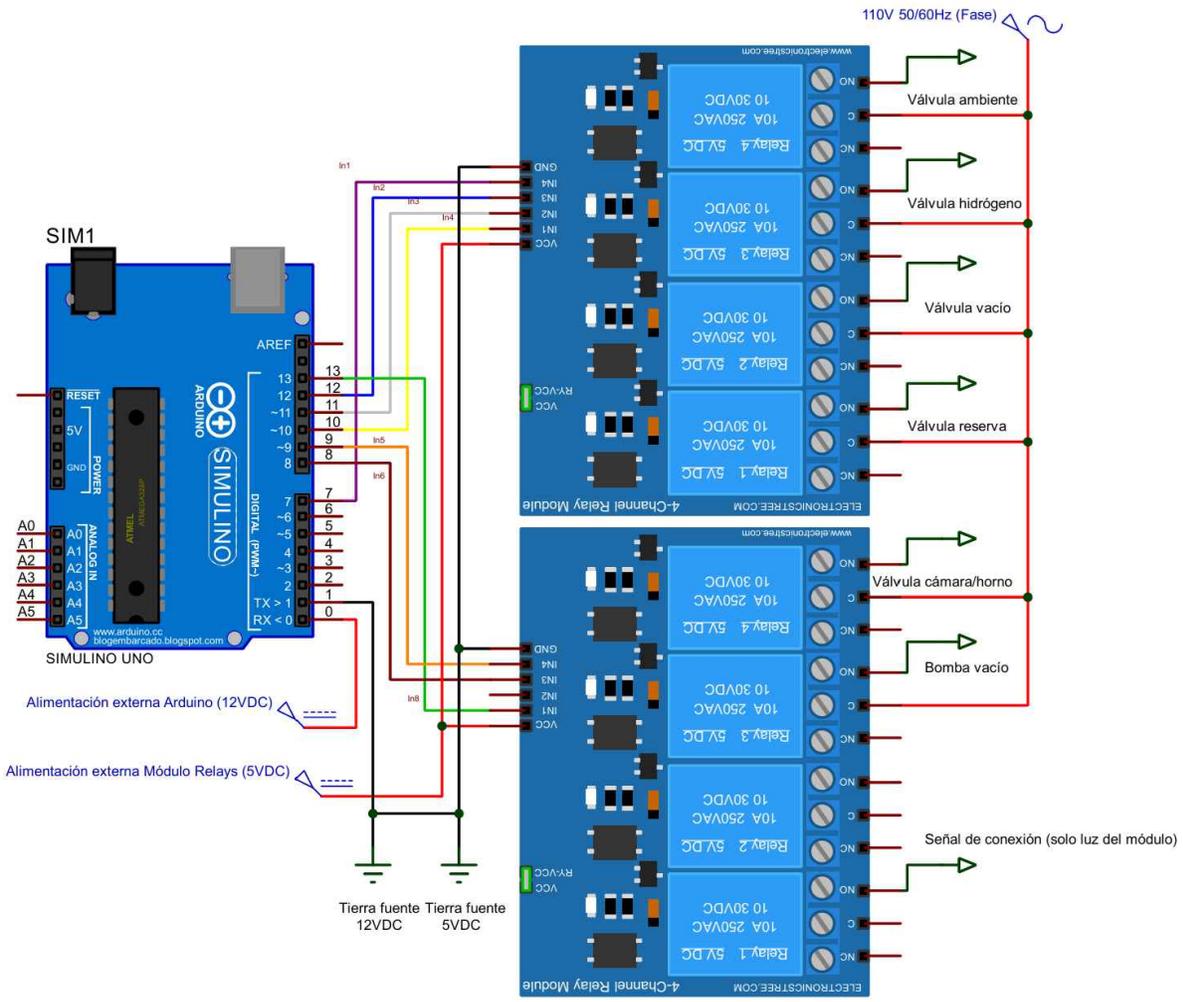


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA	ESCALA: xxx	ACOTACION: mm
	DISEÑO: K. SOLANO	FECHA: 20/10/24
	DIBUJO: K. SOLANO	SUPERVISO: xxx
PROYECTO: Plano electroneumático del control de válvulas	SISTEMA 	LÁMINA 1 / 1

## **E.2 Conexiones microcontrolador**

La fuente de 12VDC de estar conectado al pin Vin y la tierra a al pin GND, pero por limitaciones del simulador se representa conectado en TX y RX

Por limitaciones del simulador, se utilizan dos módulos de 4 relays. Hacer caso omiso a las entradas de este y prestar atención a las etiquetas



**TEC** Tecnológico de Costa Rica INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

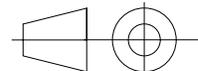
ESCALA: xxx	ACOTACIÓN: mm
DISEÑO: K. SOLANO	FECHA
DIBUJO: K. SOLANO	20/10/24
SUPERVISO: xxx	

PROYECTO:

Automatización de proceso de caracterización de niveles de hidrógeno en materiales; Conexiones microcontrolador

SISTEMA

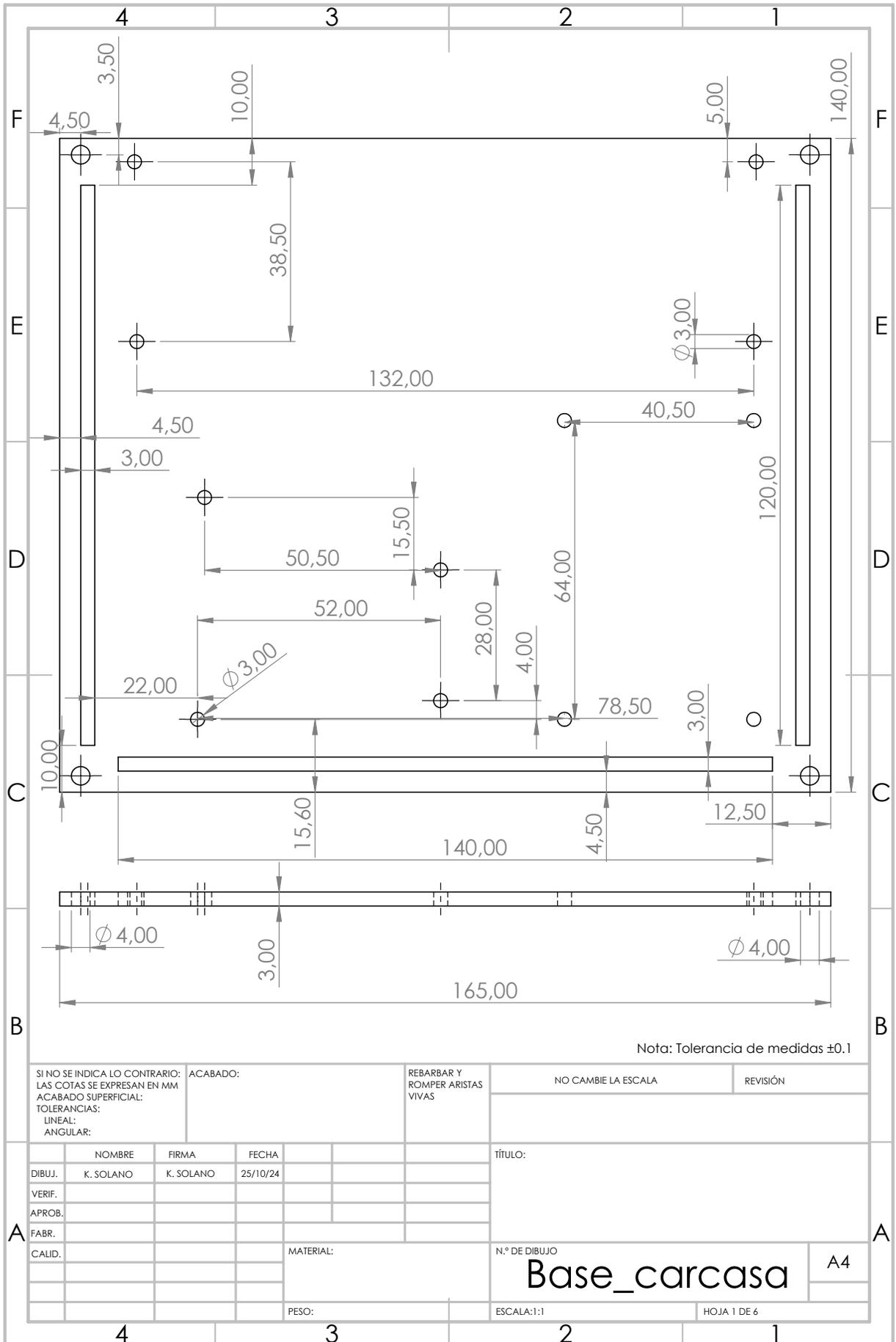
LÁMINA

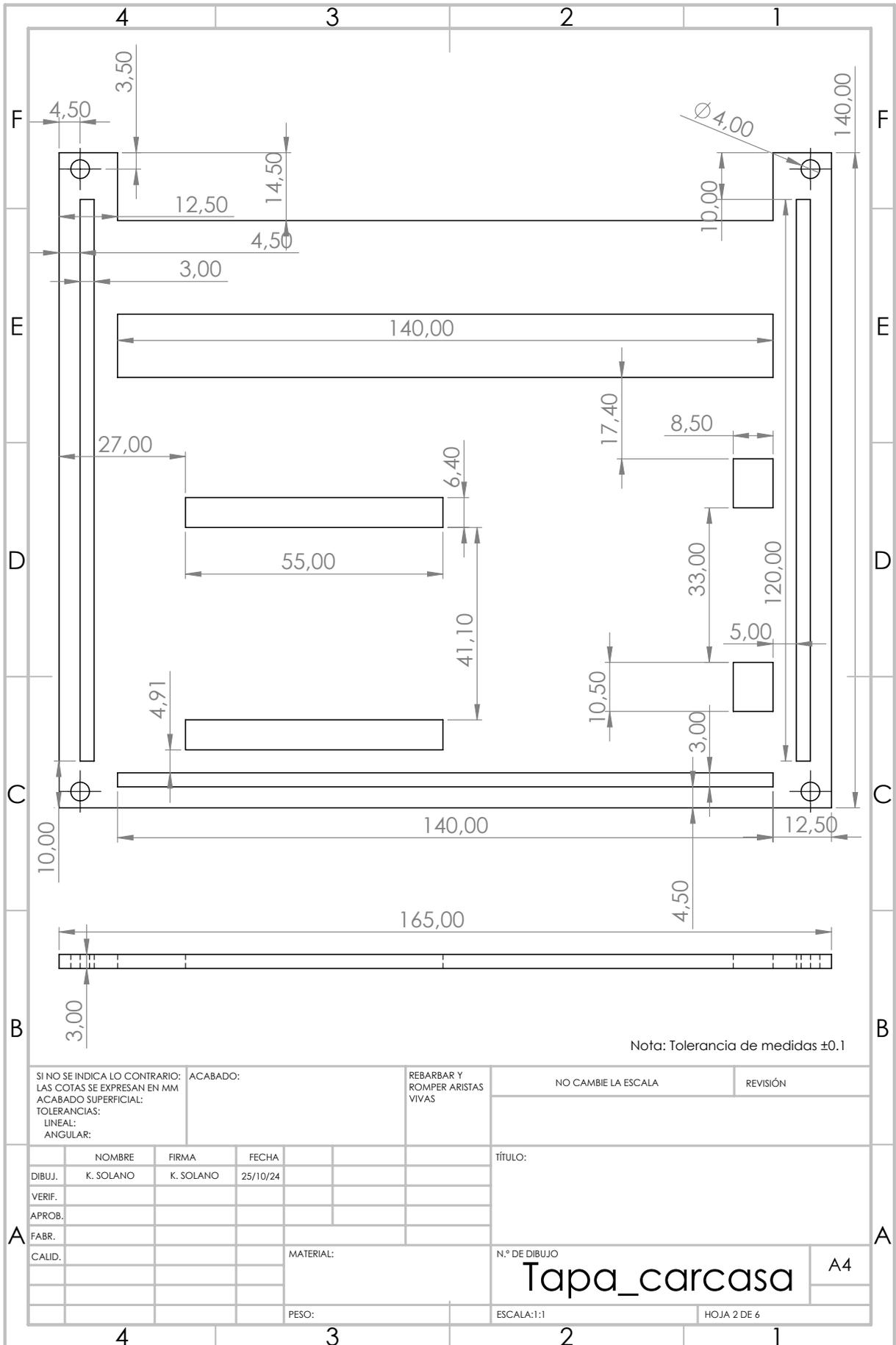


1

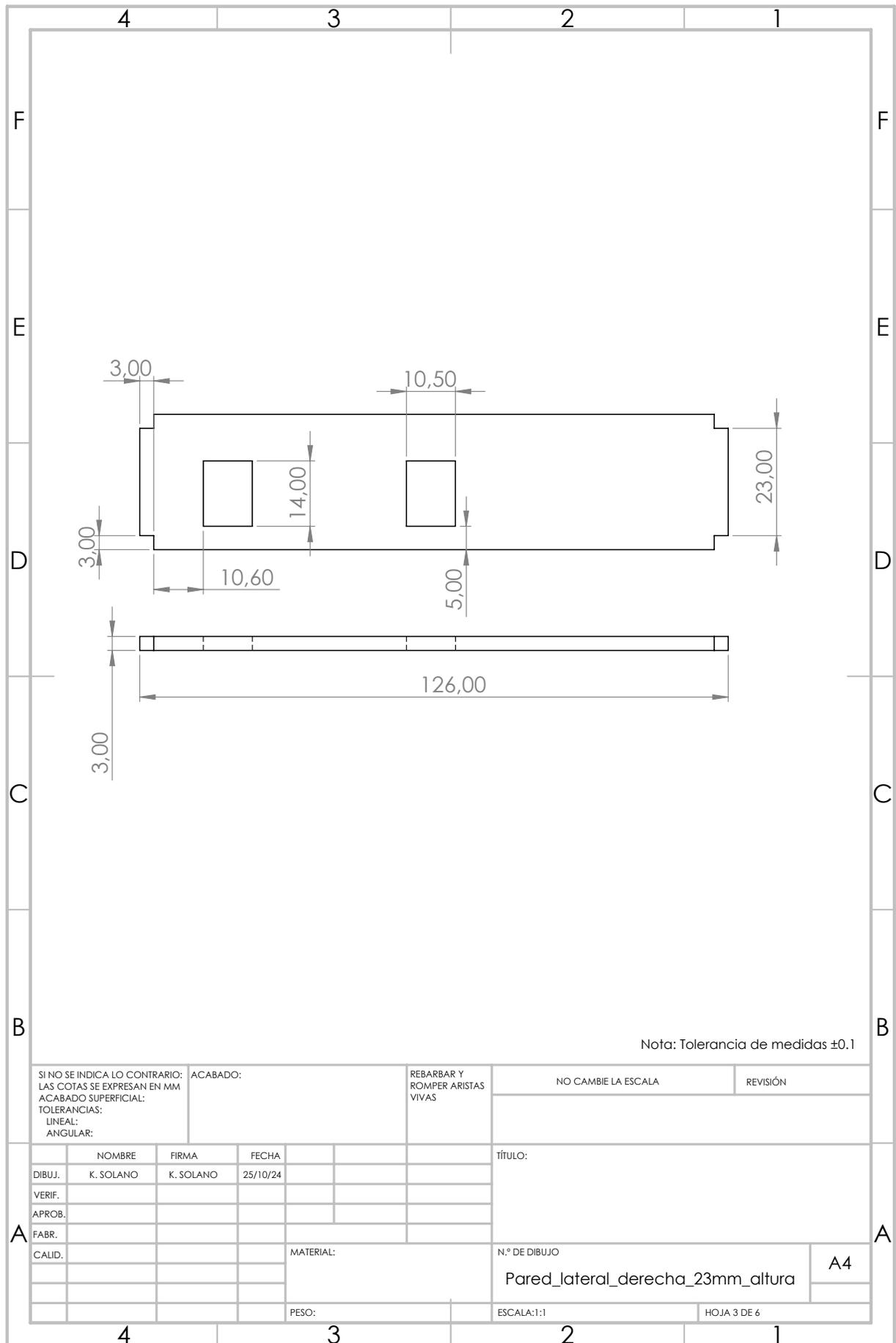
1

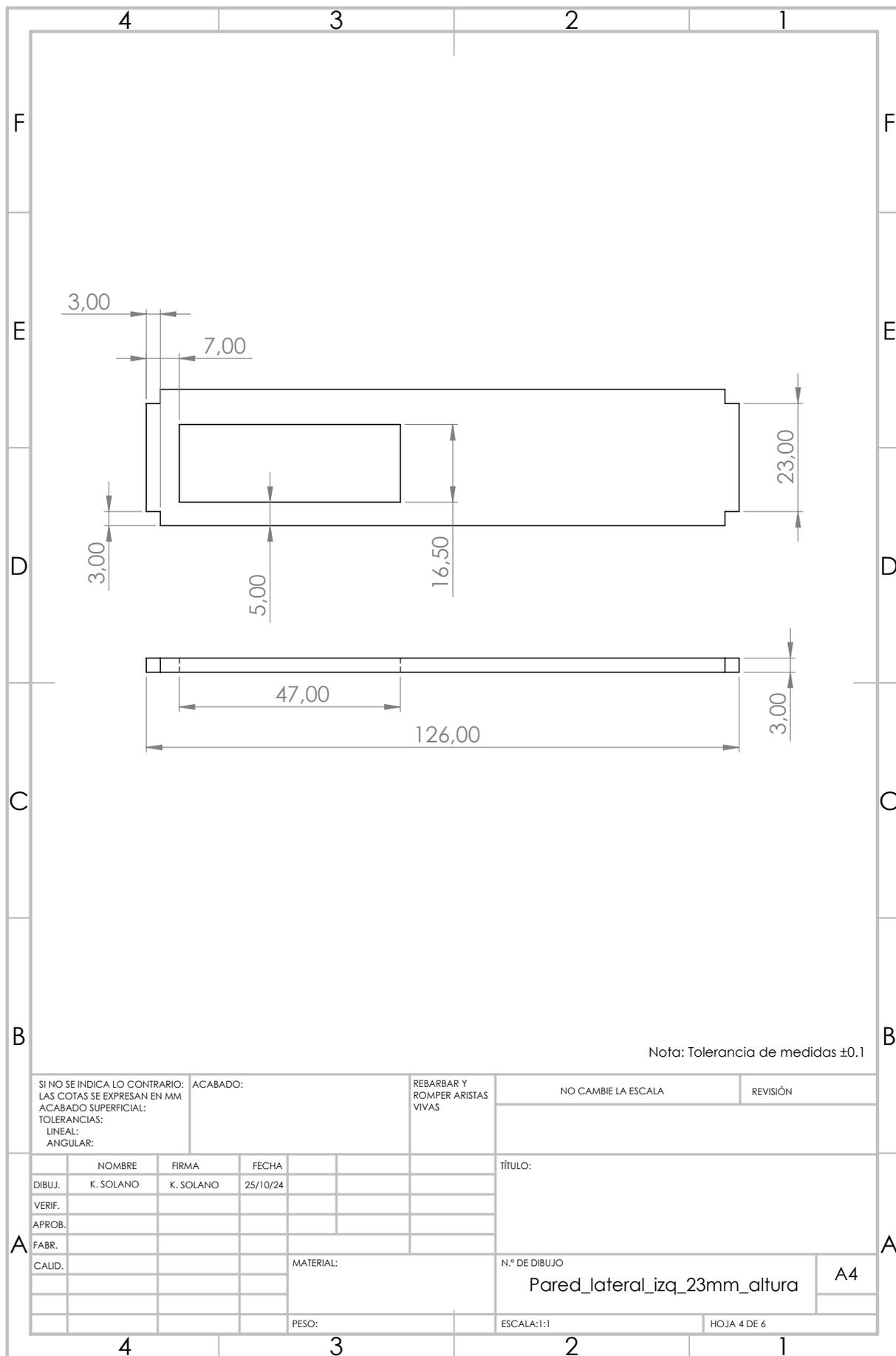
## **E.3 Carcasa**

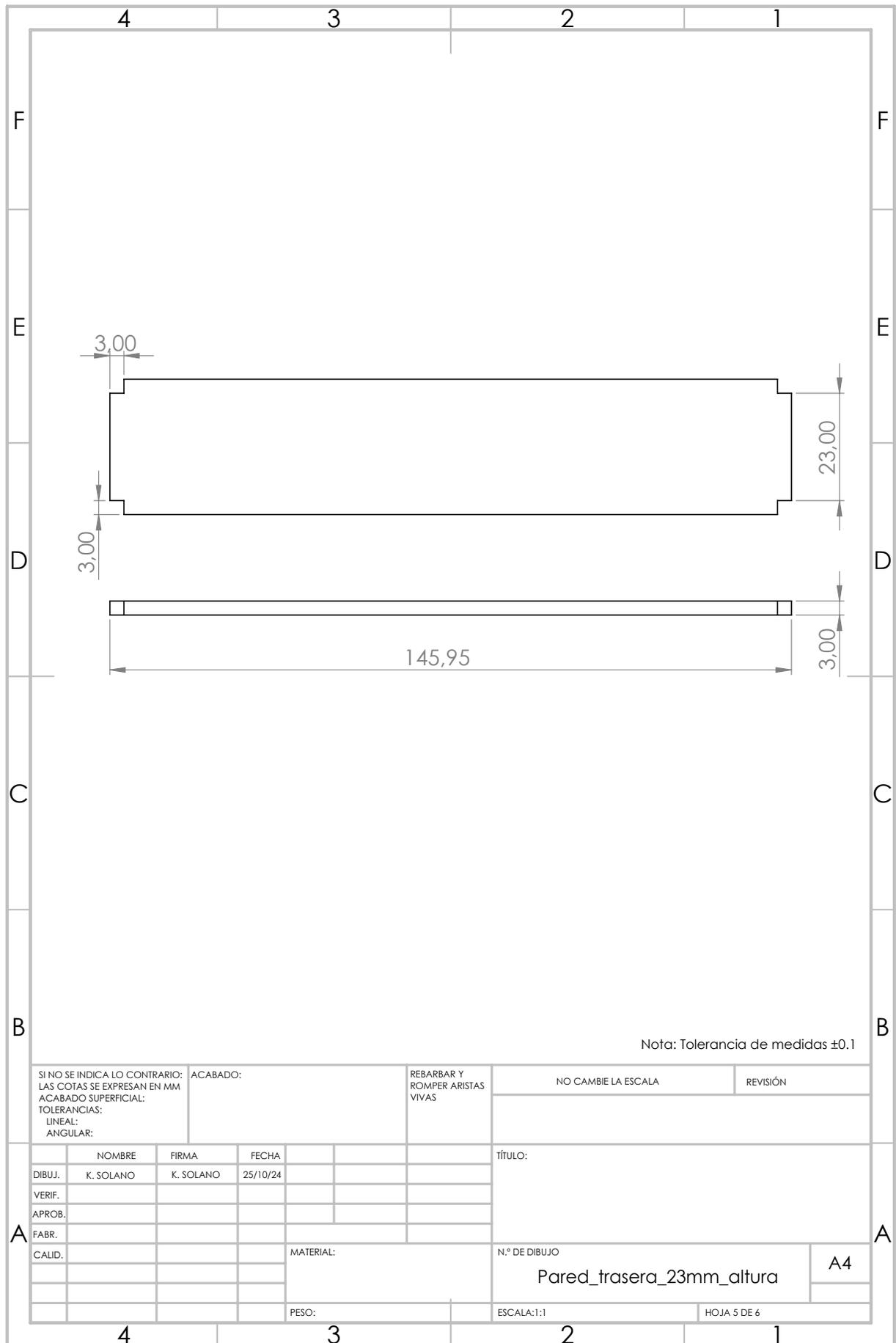




SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE K. SOLANO	FIRMA K. SOLANO	FECHA 25/10/24	TÍTULO:  <b>Tapa_carcasa</b>	
VERIF.				N.º DE DIBUJO <b>A4</b>	
APROB.				ESCALA: 1:1	
FABR.				HOJA 2 DE 6	
CALID.			MATERIAL:		
			PESO:		









# Apéndice F

## Validación y pruebas iniciales al sistema

Este apéndice comprende los resultados de las pruebas hechas al sistema. La Tabla [F.1](#) comprende la duración de la ejecución de puesta en marcha para cada operario del sistema.

**Tabla F.1:** Resultados de tiempo de pruebas de puesta en marcha del sistema por operario.

Puesta en marcha del sistema manualmente				
# Prueba	Sebastián		Daniel	
	Minutos	Segundos	Minutos	Segundos
1	4:43	283	3:36	216
2	3:47	227	3:07	187
3	3:32	212	3:06	186
4	3:12	192	3:21	201
5	3:26	206	3:22	202
6	3:19	199	3:08	188
7	3:08	188	3:14	194
8	3:19	199	2:51	171
9	3:15	195	2:53	173
10	3:23	203	2:36	156
Promedio tiempo actual	3:30	210.4	3:07	187.4
Promedio (s)	198.9			
Reducción esperada (s)	59.67			
Tiempo esperado (s)	139.23			

**Tabla F.2:** Resultados de tiempo de todas las pruebas de puesta en marcha del sistema.

Puesta en marcha del sistema manualmente	
# Prueba	Duración (s)
1	283
2	227
3	212
4	192
5	206
6	199
7	188
8	199
9	195
10	203
11	216
12	187
13	186
14	201
15	202
16	188
17	194
18	171
19	173
20	156
Promedio	198.9

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum i = 1^n x_i \quad (\text{F.1})$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum i = 1^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{F.2})$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{F.3})$$

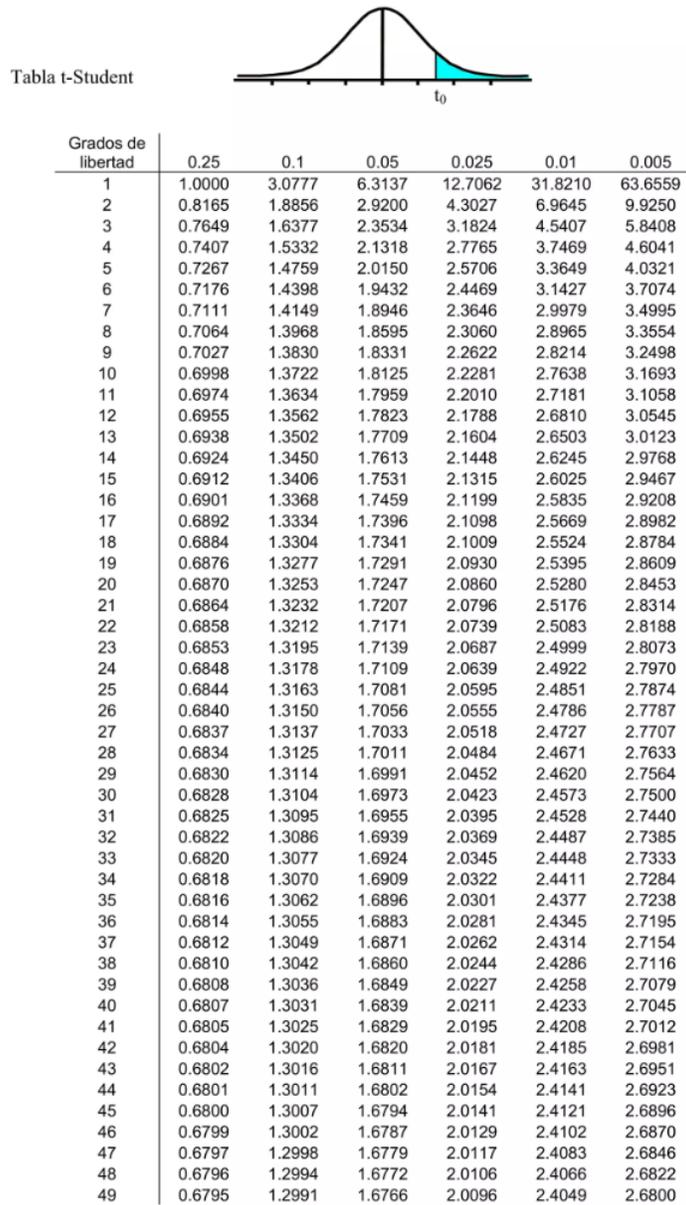


Figura F.1: Tabla t de student para cálculo del valor estadístico.

Tabla F.3: Resultados obtenidos para cantidad de pruebas a partir de la distribución t de student.

Desviación estándar ( $\sigma$ )	25.47423879
Nivel significancia ( $\alpha$ )	0.05
Nivel de confianza ( $1-\alpha$ )	0.95
$\alpha/2$	0.025
Muestra piloto ( $n_p$ )	10
Grados de libertad ( $n_p-1$ )	9
t (0.025,9)	2.2622
Margen de error (e)	18 s
Cantidad de pruebas	10.24989501

# Apéndice G

## Manual de usuario

# MANUAL DE USUARIO PARA LA UTILIZACIÓN DE LA APLICACIÓN PCT-SYSTEM-AUTO

## CONTENIDOS

<b>SYSTEM CONNECTIONS</b>	<b>2</b>
Instrucciones para el uso de la aplicación	6
<b>TESTING</b>	<b>7</b>
Valves control	7
Pressure Loss	9
Temperature Control	10
<b>SYSTEM PURGE</b>	<b>16</b>
<b>MATERIAL CHARACTERIZATION</b>	<b>17</b>
<b>GRAPHS</b>	<b>19</b>
<b>PRESSURE LOSS SIM</b>	<b>20</b>
<b>SYSTEM PURGE SIM</b>	<b>24</b>
<b>Requisitos de software</b>	<b>31</b>

## **SYSTEM CONNECTIONS**

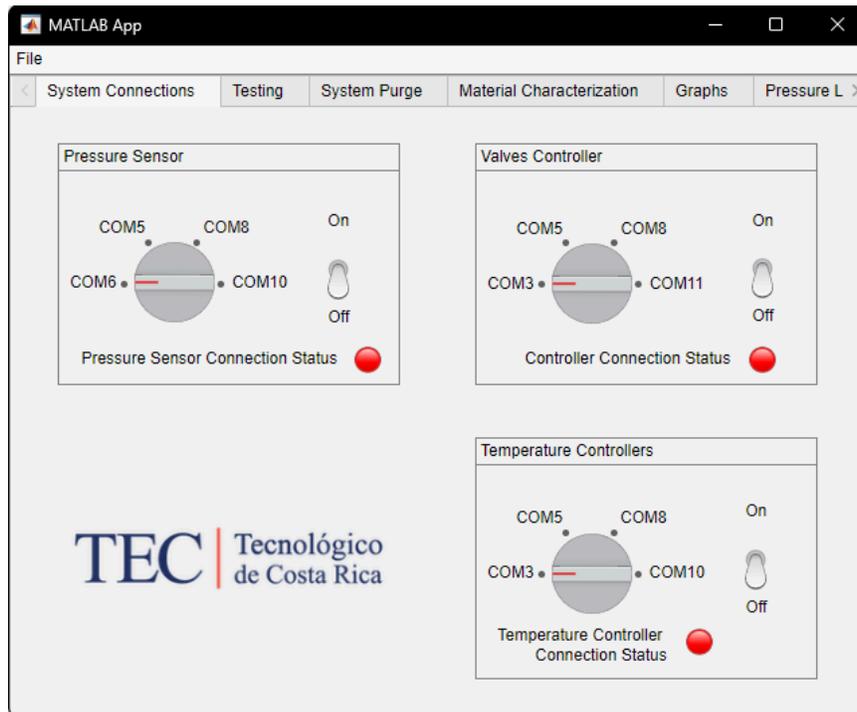


Fig. 1. Pestaña System Connections.

Esta pestaña es la primera que se muestra cuando se inicia la aplicación. Sirve para conectarse a los dispositivos. Es posible saber a cuál puerto están conectados los dispositivos mediante la utilización del administrador de dispositivos de la computadora, en Puertos (COM y LPT).

Para identificar el puerto y el dispositivo, basta con conectar y volver a conectarlo, el administrador de dispositivos debería mostrar y desaparecer el puerto correspondiente según se conecte/desconecte el dispositivo.



Fig. 2. Administrador de dispositivos.



Fig. 3. Puertos COM en la computadora.

Al ejecutar la aplicación por primera vez, el programa podría no leer ningún valor en las perillas de conexión a los puertos COM. Por lo tanto, si se presenta un error, se debe seleccionar cualquier valor en la perilla correspondiente, seleccionar el puerto correcto y reintentar la conexión.

Una vez seleccionado el puerto, encienda el switch correspondiente. Debe mostrar un mensaje de conexión establecida y la luz debe estar en verde. Si es la primera vez que se ejecuta el programa en la computadora, la conexión con el controlador de válvulas podría tardar unos minutos.

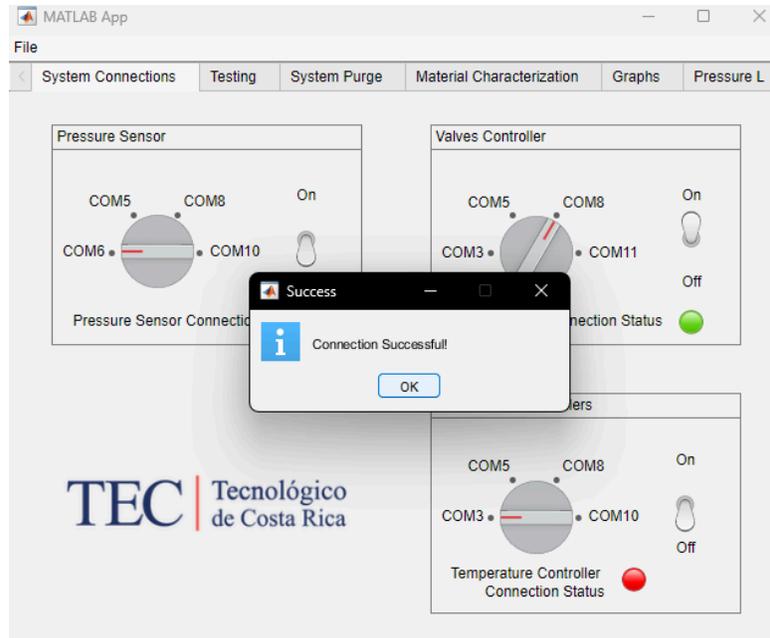


Fig. 4. Conexión establecida.

Si el puerto seleccionado es erróneo, no está disponible o por alguna razón no consigue establecer conexión, el programa notifica qué error se dio.

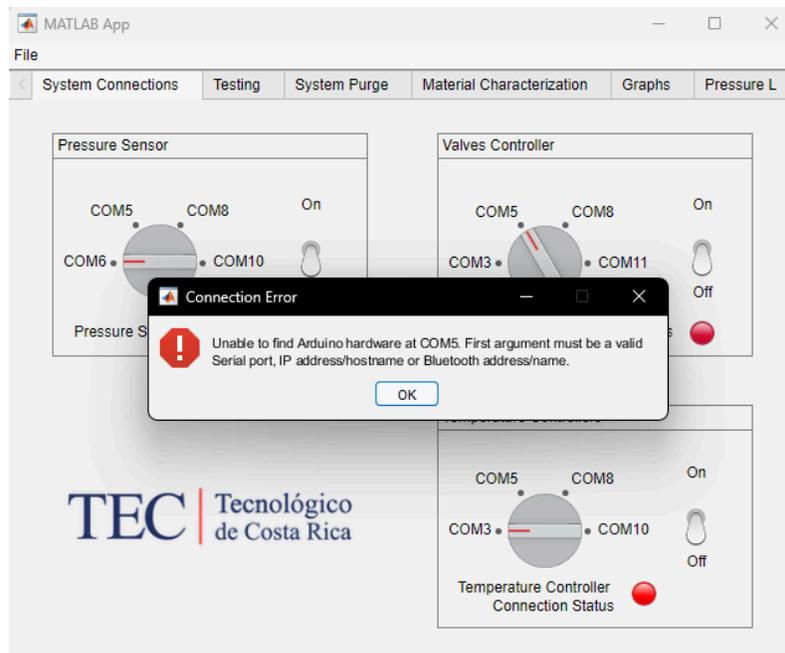


Fig. 5. Error en conexión.

Para utilizar todos los procesos disponibles, se deben tener todos los siguientes dispositivos conectados:

- Para control de válvulas: Valves controller.
- Para prueba pérdidas de presión y purga del sistema: Valves controller y Pressure sensor.
- Para control de temperatura: Temperature controller.
- Para caracterización de material: Todos.

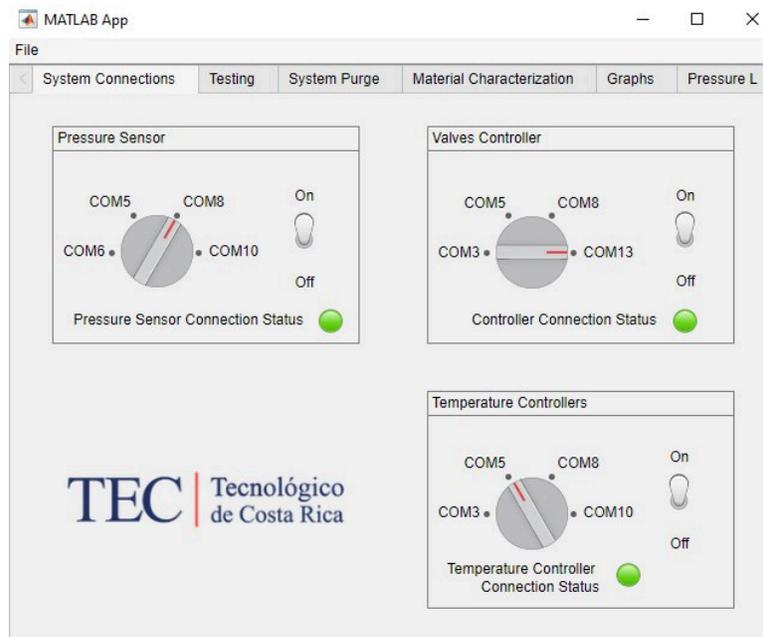


Fig. 6. Conexión de dispositivos.

## ***Instrucciones para el uso de la aplicación***

1. **Pruebas iniciales de válvulas:**
  - Al iniciar la aplicación, acceda a la pestaña **Testing > Valves Control** para realizar pruebas individuales de las válvulas. Esto valida el funcionamiento del manifold y las válvulas neumáticas antes de ejecutar cualquier proceso.
  
2. **Validación del sistema:**
  - Verifique el correcto funcionamiento de las válvulas y luego ejecute las pruebas de **pérdidas de presión** y **control de temperatura** en la pestaña **Testing**.
  
3. **Descarga de datos:**
  - Para descargar datos correctamente, siempre, presione **Stop** antes de utilizar el botón de **Descarga**, sin importar si el proceso ha finalizado.
  - Si está ejecutando simultáneamente pruebas de **pérdidas de presión** o **purga del sistema** junto con el **control de temperatura**, siga el mismo procedimiento: primero presione **Stop** y luego **Descarga** en el proceso correspondiente.
  
4. **Procesos en ejecución:**
  - Los procesos que pueden ejecutarse incluyen: **System Purge Sim**, **Pressure Loss Sim**, y **Temperature Control**.
  
5. **Entrada de datos:**
  - Después de escribir un valor en un cuadro de texto, presione siempre la tecla **Enter** para validar la entrada.
  
6. **Cambios en procesos en ejecución:**
  - Detenga siempre el proceso actual antes de realizar cualquier cambio en los parámetros. Una vez realizados los ajustes, reinicie el proceso.

Estas instrucciones aseguran un uso correcto y eficiente de la aplicación, minimizando errores operativos y garantizando la validez de los datos recopilados.

## TESTING

### Valves control

Si el controlador de válvulas no está conectado, la pestaña estará inhabilitada.

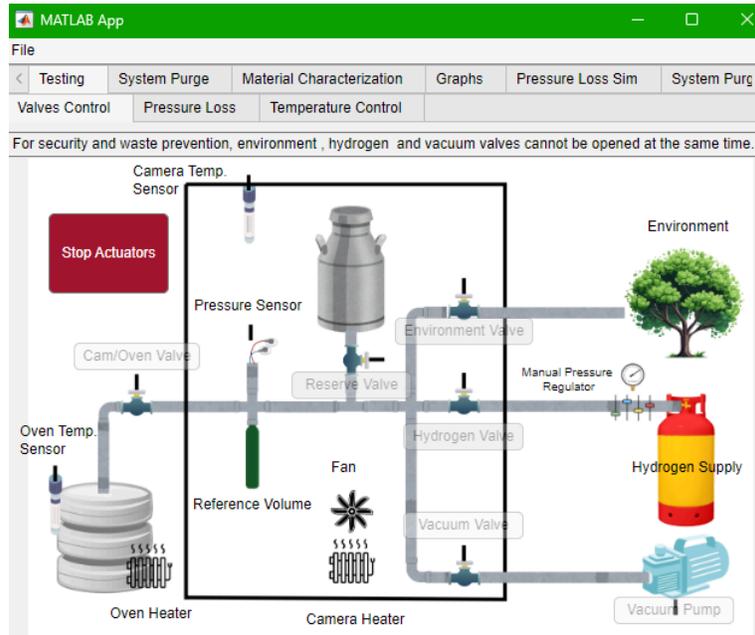


Fig. 7. Botones de control de válvulas deshabilitados debido a no conexión con controlador de válvulas.

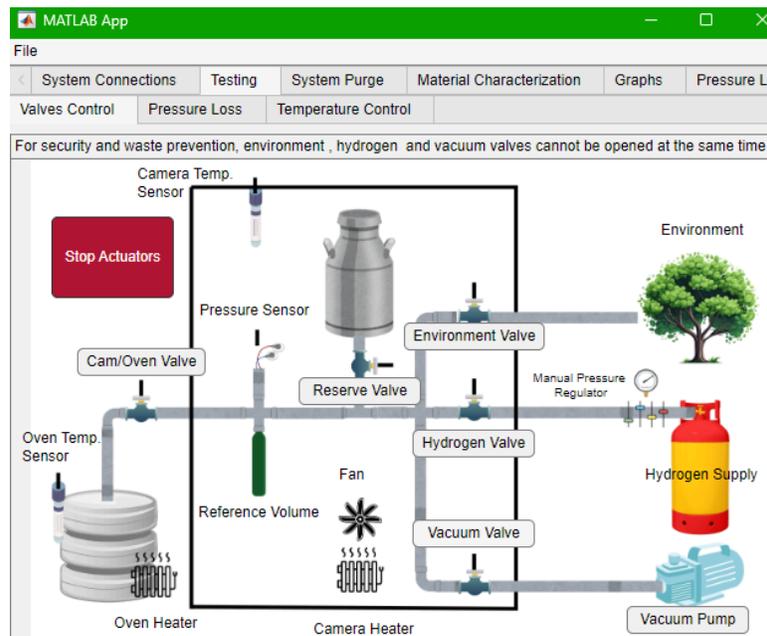


Fig. 8. Botones de control de válvulas habilitados luego de conexión con controlador.

Una vez la pestaña está habilitada, se debe presionar sobre los botones para activar las válvulas correspondientes. Las válvulas encendidas cambiarán a color verde en la interfaz y las apagadas a gris.

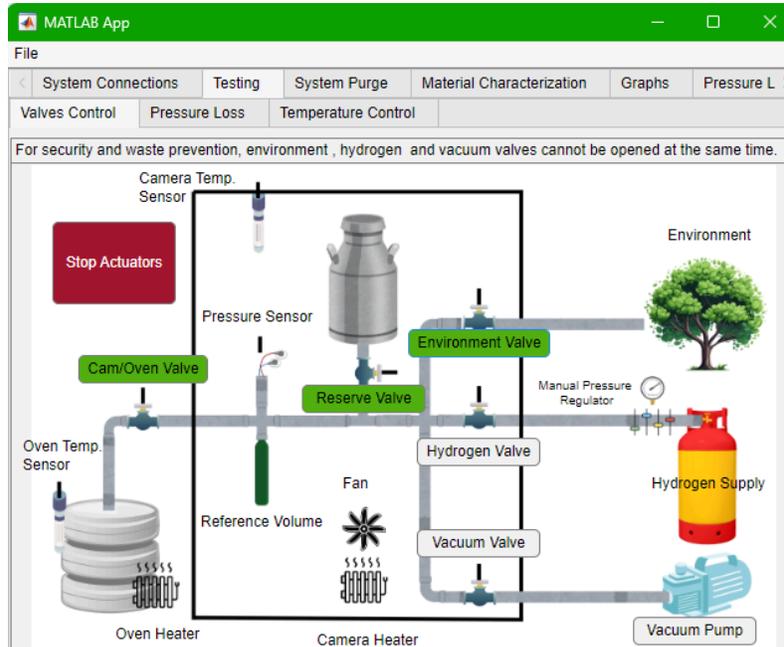


Fig. 9. Encendido/Apagado de válvulas.

El botón de stop detiene y deshabilita las válvulas hasta que se vuelva a presionar para habilitarlas nuevamente. Cuando el botón está presionado, tiene un color rojo más notorio.

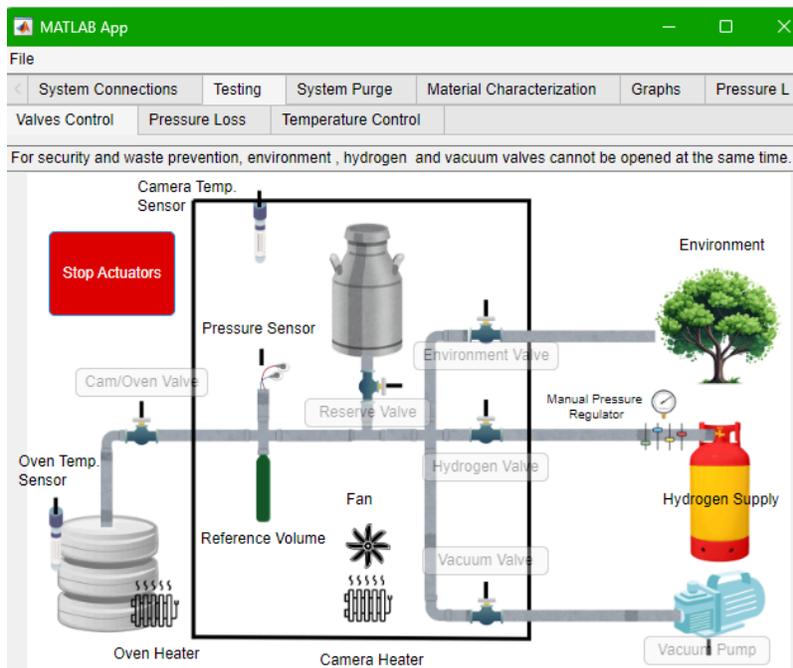


Fig. 10. Botón Stop encendido.

## Pressure Loss

Esta pestaña no está habilitada debido a la falta del sensor de presión en el sistema. Sin embargo, se puede habilitar y ejecutaría lo mismo que lo descrito más adelante en la pestaña de simulación de proceso de pérdidas de presión.

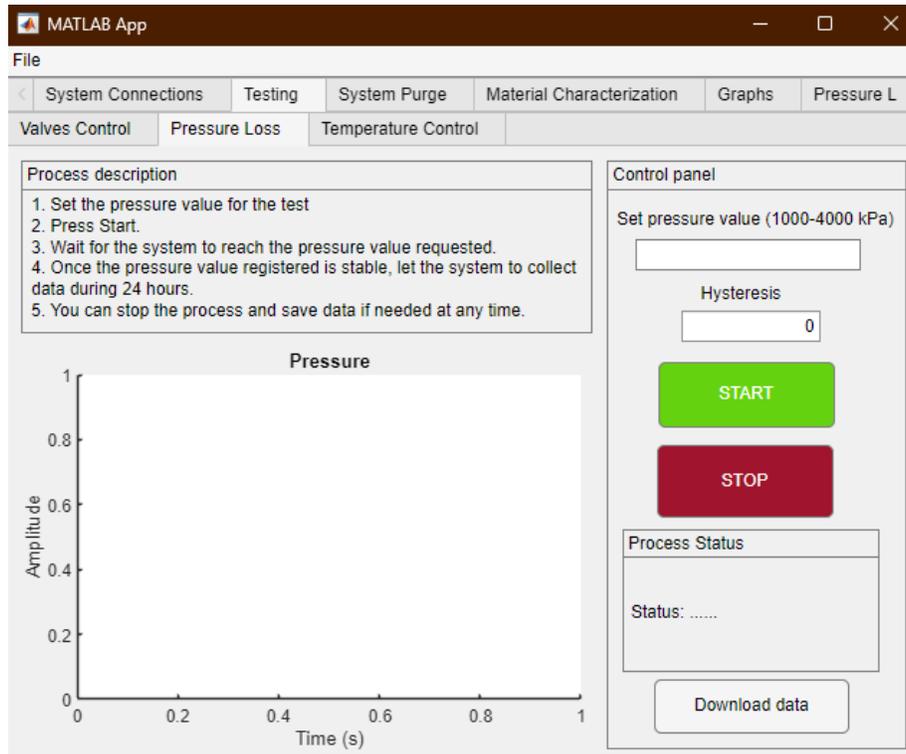


Fig. 11. Pestaña de prueba de pérdidas de presión.

## Temperature Control

Las configuraciones de los controladores de temperaturas previo a la utilización de estos es la siguiente:

- Controlador Cámara:
  - PAR1:
    - r-S → run
    - Cr-A → 0.0
    - AL1.H → 1550
    - AL2.L → 1550
  - PAR2:
    - At → off
    - H-P → 1.0
    - H-I → 200
    - H-d → 41
  - PAR3:
    - In-t → ycah.h
    - Unit → °C
    - In-b → 000
    - o-Ft → Heat
    - C-ñd → PID
    - H-t → 20.0
  - PAR4:
    - AL-1 → du[[
    - AL1.t → AL-E
    - A1.HY → 001
    - AL-2 → ]]du
    - AL2.t → AL-A
    - A2.HY → 001
    - AdrS → 02
    - bPS → 96
    - Prty → none
    - Stp → 2
    - rSY.t → 20
    - CoñY → En.A
  - PAR5:
    - USEr → Stnd
    - LC.Su → off
    - LC.P1 → off
    - LC.P2 → off
    - LC.P3 → off
    - LC.P4 → off
    - LC.P5 → off
    - PYD → 0000
    - PAYS → 000
- Controlador Horno:

- PAR1:
  - r-S → run
  - Cr-A → 0.0
  - AL1.H → 1550
  - AL2.L → 1550
- PAR2:
  - At → off
  - H-P → 63.6
  - H-I → 234
  - H-d → 48
- PAR3:
  - In-t → ycah.h
  - Unit → °C
  - In-b → 000
  - o-Ft → Heat
  - C-ñd → PID
  - H-t → 20.0
- PAR4:
  - AL-1 → du[[
  - AL1.t → AL-E
  - A1.HY → 001
  - AL-2 → ]]du
  - AL2.t → AL-A
  - A2.HY → 001
  - AdrS → 01
  - bPS → 96
  - Prty → none
  - Stp → 2
  - rSY.t → 20
  - CoñY → En.A
- PAR5:
  - USEr → Stnd
  - LC.Su → off
  - LC.P1 → off
  - LC.P2 → off
  - LC.P3 → off
  - LC.P4 → off
  - LC.P5 → off
  - PYD → 0000
  - PAYS → 000

Para hacer prueba de control de temperatura. Sin los controladores de temperatura conectados, los botones no realizan ninguna acción.

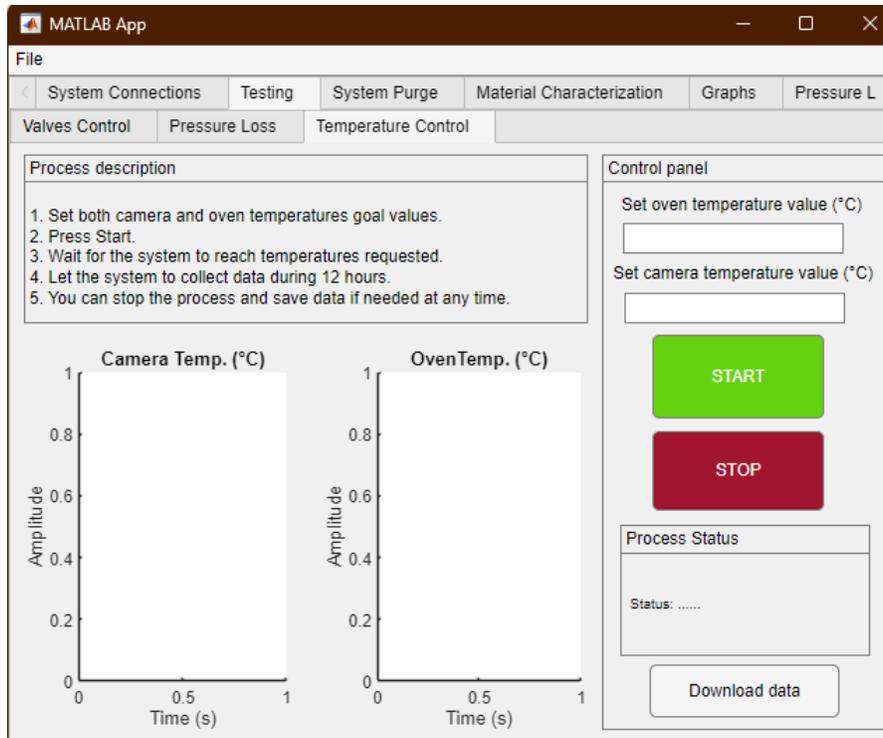


Fig. 12. Pestaña de pruebas de control de temperatura.

Con los controladores conectados, se deben establecer los valores de temperatura a los que se quieren llevar el horno y la cámara. Seguidamente, se debe presionar Start.

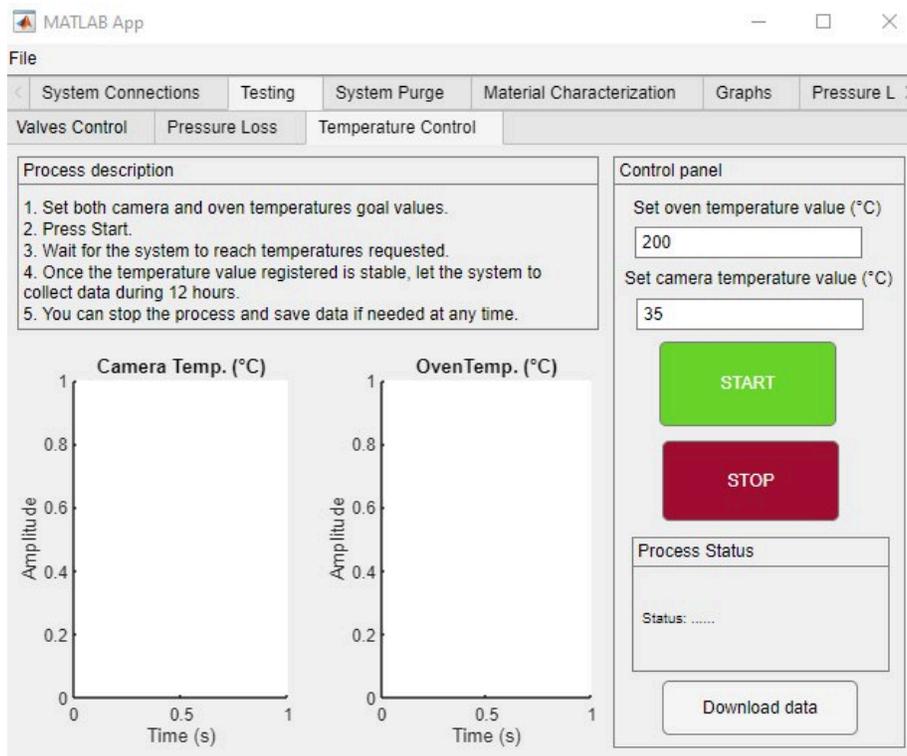


Fig. 13. Establecimiento de parámetros para control de temperatura.

Se puede observar físicamente en los controladores el cambio del setpoint (color verde).



Fig. 14. Establecimiento de temperaturas en controladores.

Las gráficas iniciarán a mostrar los datos actuales del sistema y se comienza el registro de datos. En el recuadro de Process Status se encuentra información sobre lo que está realizando el sistema. Pueden aparecer 3 mensajes: Estabilizando, Estabilizado o Proceso Finalizado.

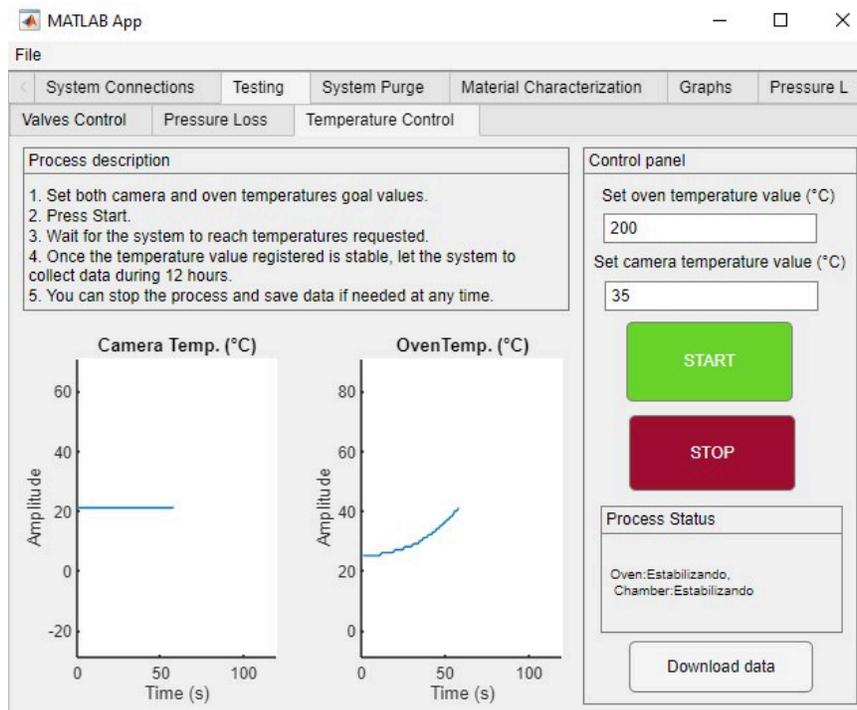


Fig. 15. Funcionamiento de control de temperatura.

Además, en la pestaña de Graphs se puede observar el valor exacto de temperatura en el que se encuentran la cámara y el horno.

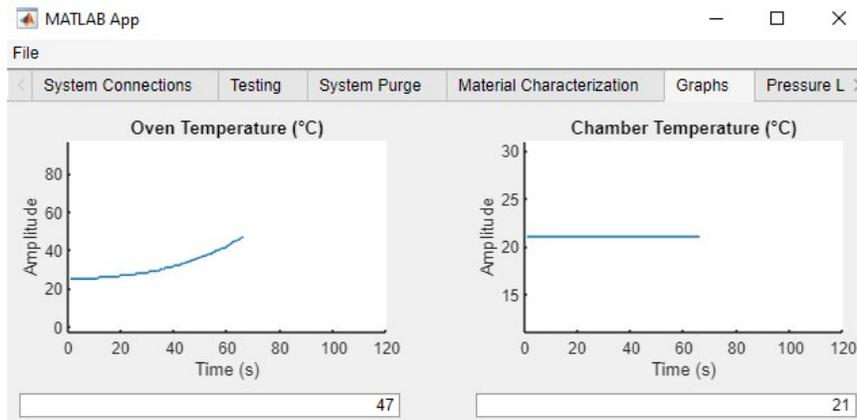


Fig. 16. Gráficas de control de temperatura en la pestaña de Graphs.

Si se presiona el botón de Stop en cualquier momento, el sistema dejará de recolectar datos y apagará los calentadores enviando 0 °C como setpoint a estos.



Fig. 17. Apagado de calentadores.

Luego de presionar el botón de stop, se pueden descargar los datos mediante el botón Download Data. Si el proceso finaliza naturalmente, los datos se descargan automáticamente.

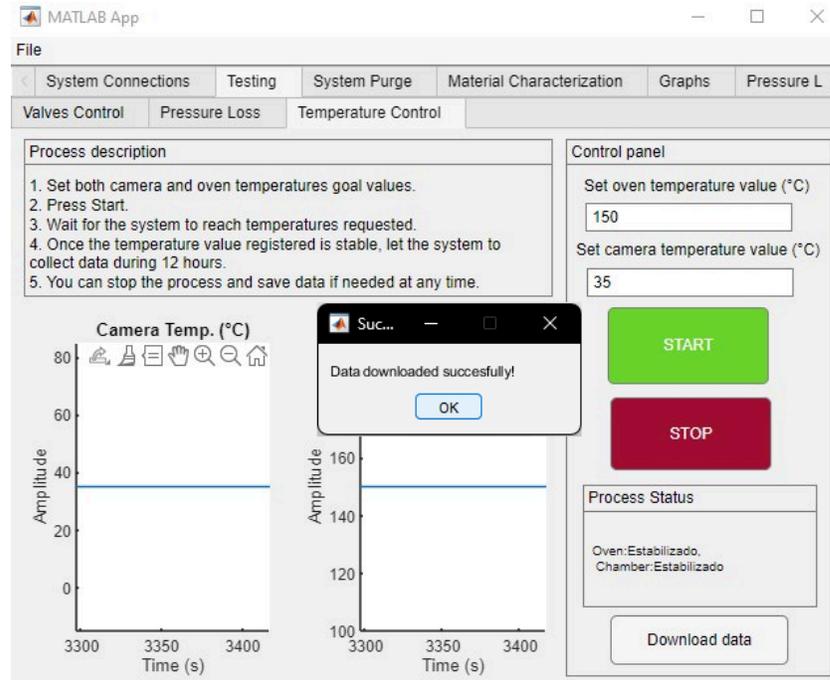


Fig. 18. Descarga de datos.

El rango de valores permitido para el horno es de 20-400°C y para la cámara es de 20-40°C. El programa notificará si el valor solicitado no está dentro de estos rangos.

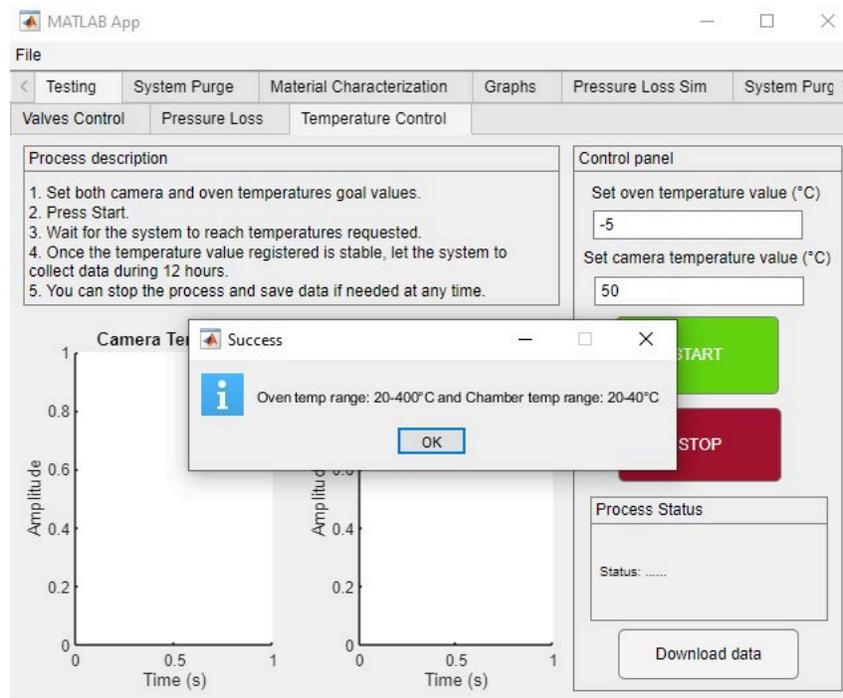


Fig. 19. Error en establecimiento de parámetros.

## **SYSTEM PURGE**

Esta pestaña no está habilitada debido a la falta del sensor de presión en el sistema. Sin embargo, se puede habilitar y ejecutaría lo mismo que lo descrito más adelante en la pestaña de simulación de proceso de purga del sistema.

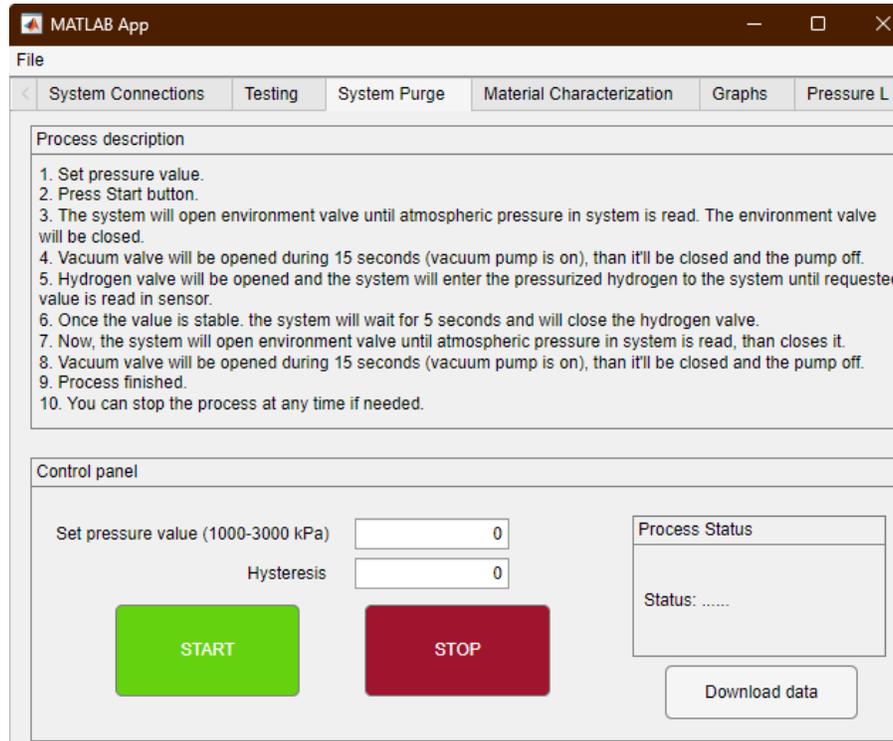


Fig. 20. Pestaña de proceso de purga del sistema.

## **MATERIAL CHARACTERIZATION**

Esta pestaña no está habilitada debido a la falta del sensor de presión en el sistema. Además, la cantidad de memoria RAM del sistema actual no permite el registro de datos por más de 8 horas para este proceso. Sin embargo, se puede hacer una prueba semiautomática mediante la manipulación de las pestañas de Valves Control y Temperature Control.

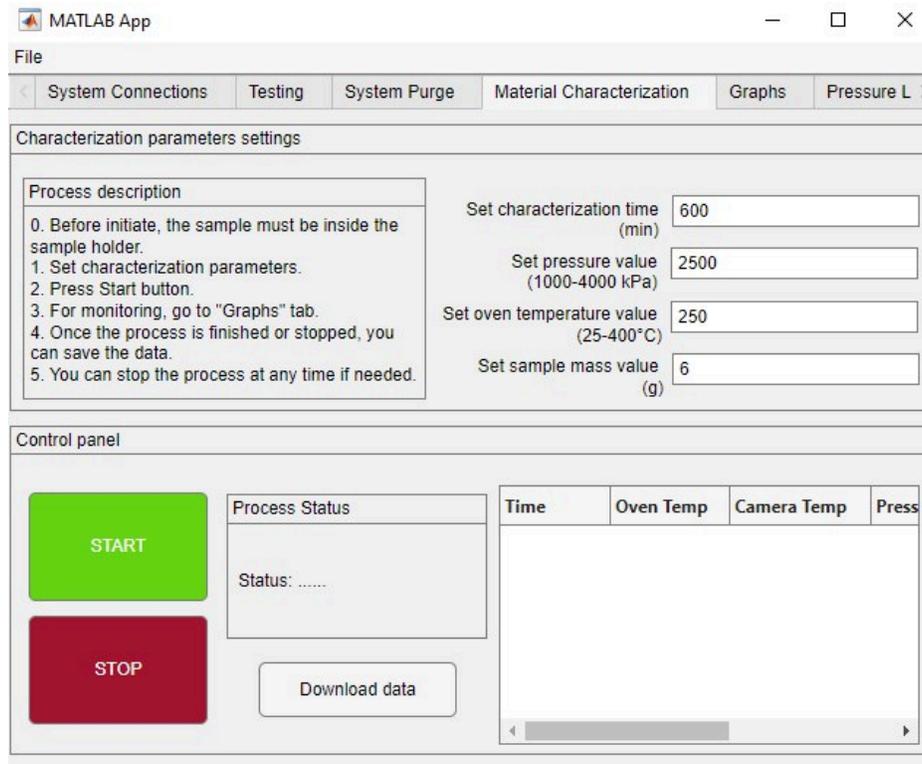


Fig. 21. Pestaña de proceso de caracterización de material.

Este proceso sigue la lógica del siguiente diagrama de flujo.

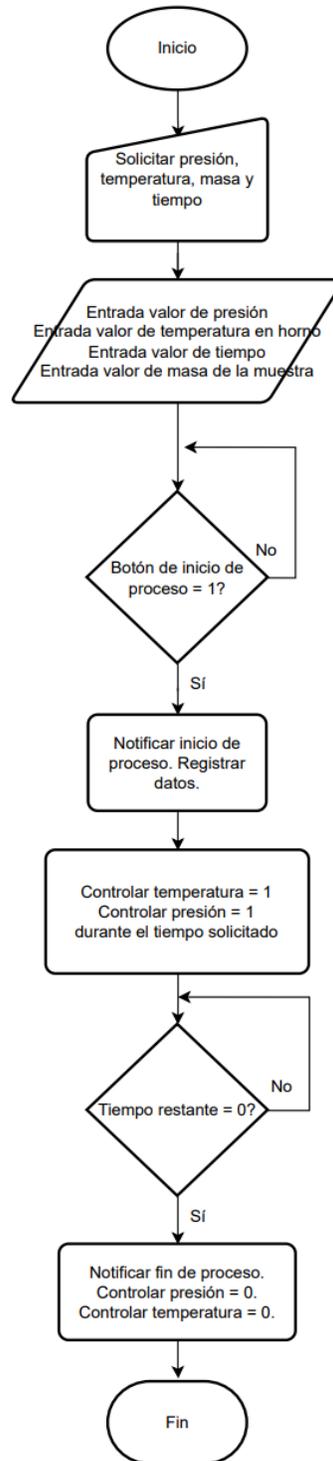


Fig. 22. Diagrama de flujo del proceso de caracterización de material.

## GRAPHS

En esta pestaña se pueden observar las gráficas y datos del sistema en tiempo real respecto a la presión y temperatura.

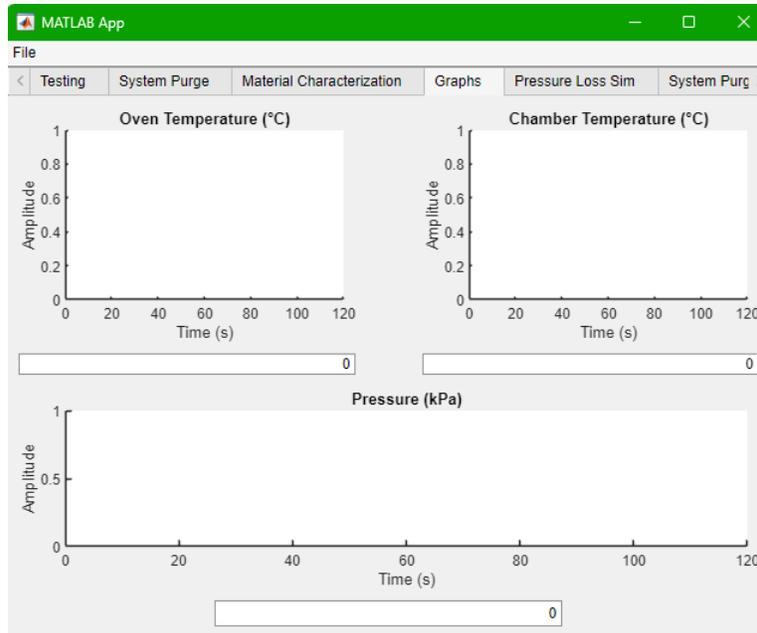


Fig. 23. Pestaña de gráficos sin dispositivos conectados.

Al conectarse con los controladores de temperatura o sensor de presión, esta pestaña iniciará con la muestra de datos automáticamente. En cualquier momento, independientemente del proceso que se esté realizando, esta pestaña estará disponible.

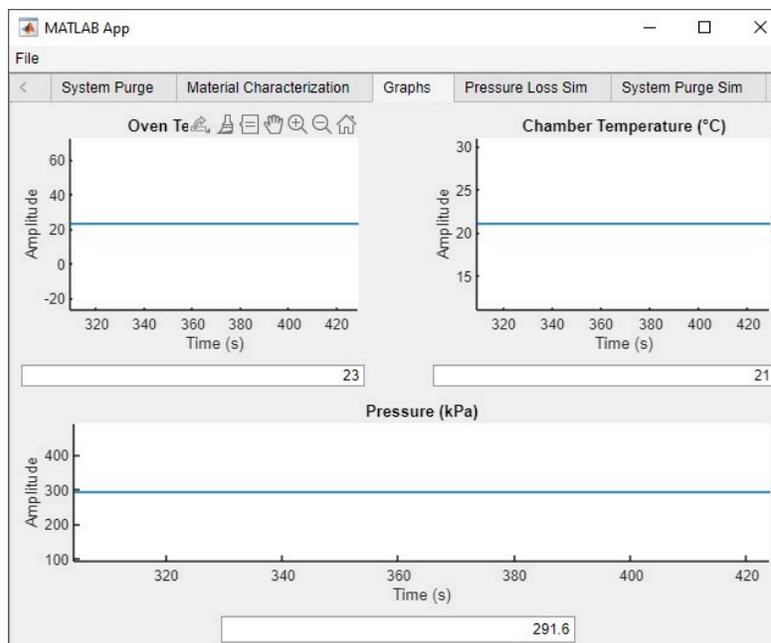


Fig. 24. Pestaña de gráficos con dispositivos conectados.

## PRESSURE LOSS SIM



Fig. 25. Pestaña de simulación de control de presión.

Esta pestaña tiene como objetivo validar el comportamiento de las válvulas del sistema y el control de presión. Primero se deben establecer los valores de presión e histéresis dentro del rango (50-500 para histéresis y 1000-3000 para valor de presión). Seguidamente, mediante el uso de la perilla, establezca la presión “a la que se encuentra” el sistema y presione Start (este paso se omite si el sensor está disponible). Esto provocará que se inicie la graficación y registro de datos. Mostrará los estados de estabilizando o estabilizado según corresponda.

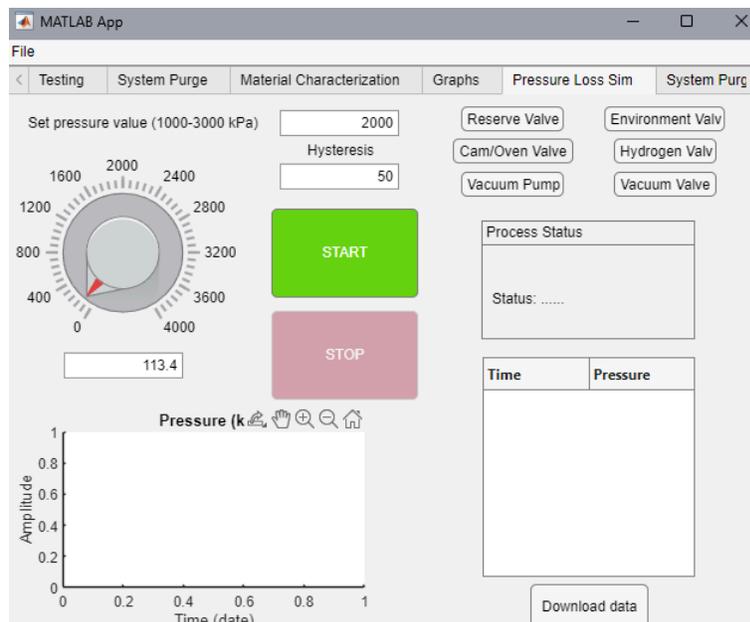


Fig. 26. Establecimiento de parámetros antes de la simulación de pérdidas de presión.

A partir de este punto, el programa ejecuta el siguiente algoritmo para estabilizar la presión. Además, las pestañas de Testing Claves Control y System Purge Sim estarán deshabilitadas hasta detener el proceso.

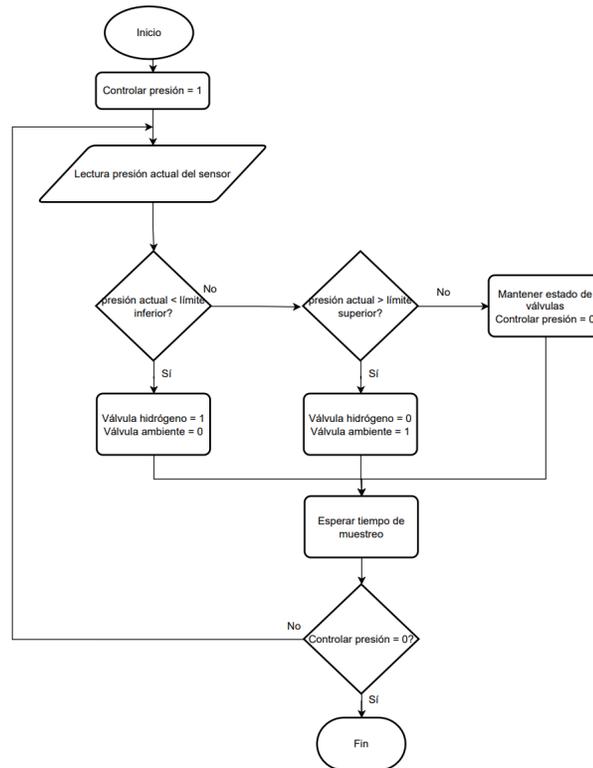


Fig. 27. Diagrama de flujo del control de presión.

Se puede observar mediante la manipulación de la perilla, como el aumento o disminución de la presión afecta a las válvulas físicamente. Una vez estabilizada la presión, el sistema recolectará datos.

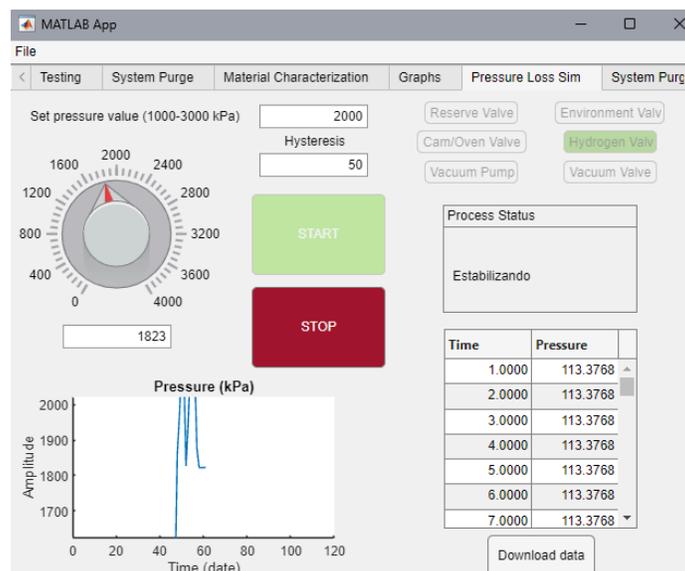


Fig. 28. Control de presión; inyección de hidrógeno.

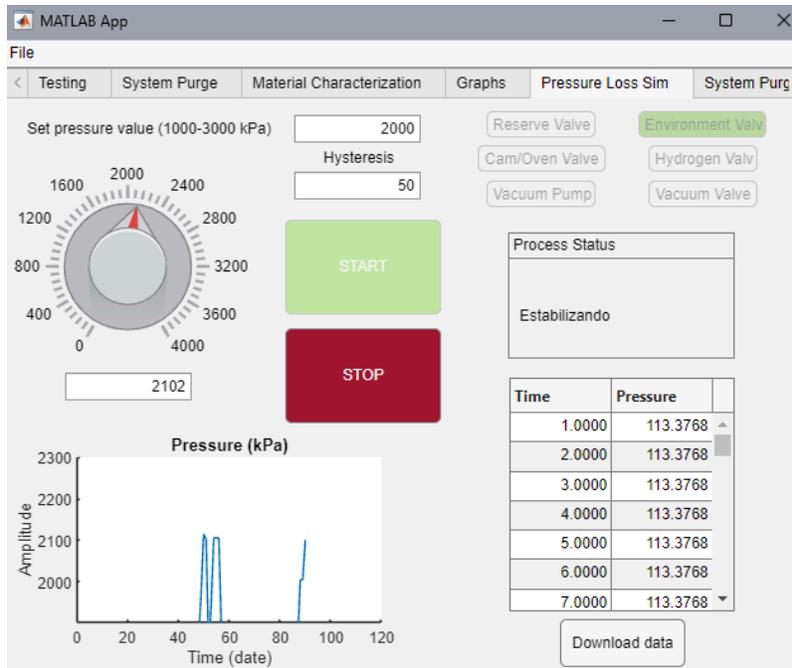


Fig. 29. Control de presión; sustracción de hidrógeno.

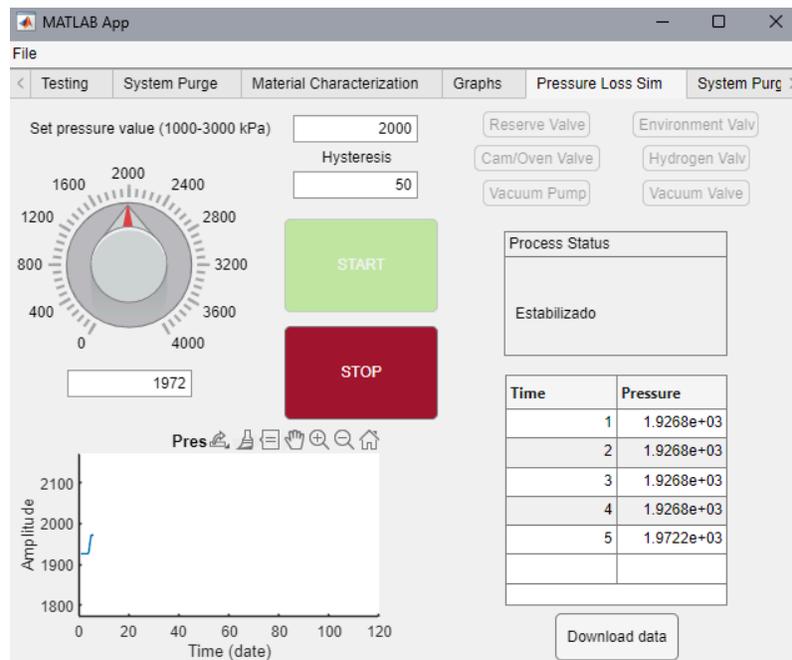


Fig. 30. Control de presión; presión estabilizada.

Al finalizar la prueba, se pueden descargar los datos. Además, si el proceso se detiene en cualquier momento, dejará de graficar y registrar datos, sin embargo, se pueden descargar los datos igualmente, luego de presionar Stop.

Una vez pasen 5 segundos con la presión estable, las válvulas se deshabilitarán. Esto permite que el sistema se quede monitoreando durante cierto tiempo si hay pérdidas de presión. Al finalizar la prueba, se pueden descargar los datos para su respectivo análisis.

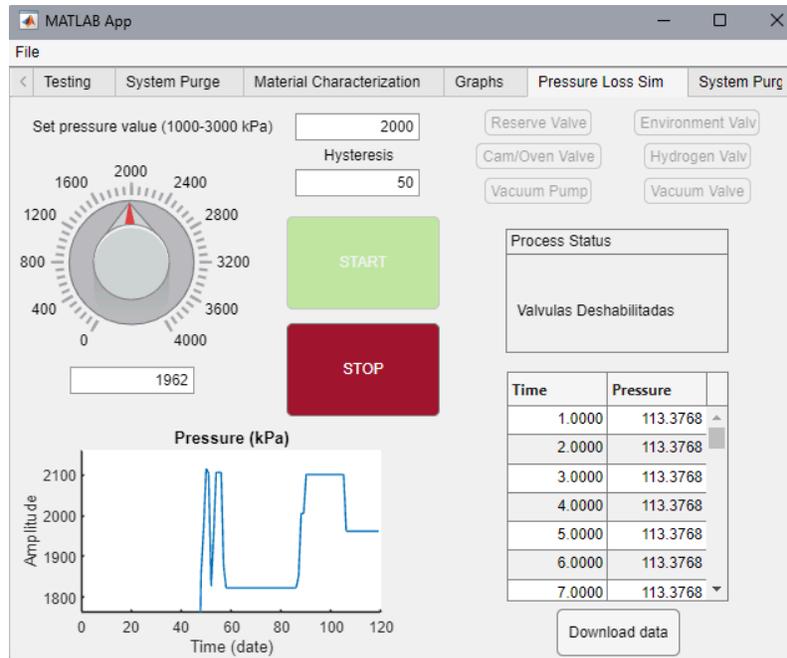


Fig. 31. Presión estabilizada y válvulas deshabilitadas.

## SYSTEM PURGE SIM

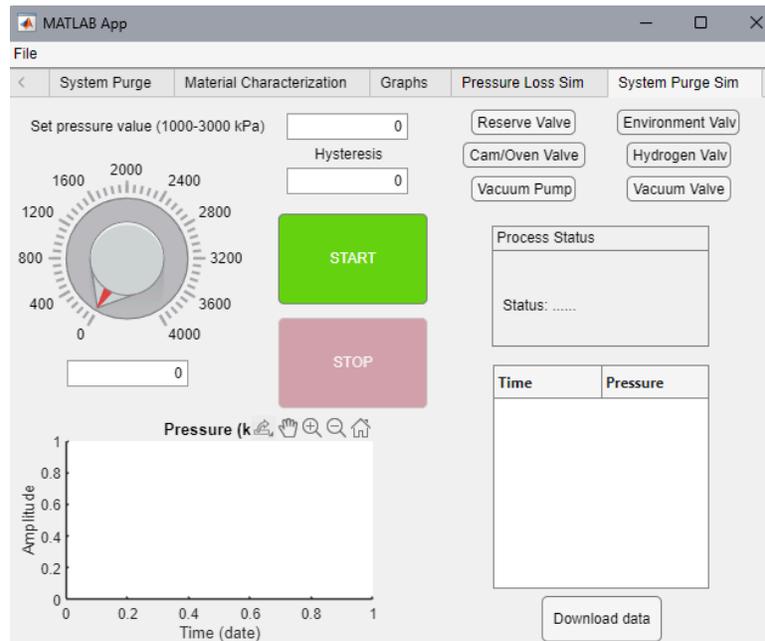


Fig. 32. Pestaña de simulación de proceso de purga del sistema.

Esta pestaña tiene como objetivo validar el comportamiento de las válvulas del sistema y el control de presión durante la ejecución del proceso de purga del sistema. Primero se deben establecer los valores de presión e histéresis. Seguidamente, mediante el uso de la perilla, establezca la presión “a la que se encuentra” el sistema y presione Start. Esto provocará que se inicie la graficación y registro de datos. Mostrará los estados de estabilizando o estabilizado según corresponda.



Fig. 33. Establecimiento de parámetros antes de la simulación de purga del sistema.

La purga del sistema sigue el siguiente diagrama de flujo. Además, el inicio de este proceso deshabilita las pestañas de Testing Valves Control y Pressure Loss Sim.

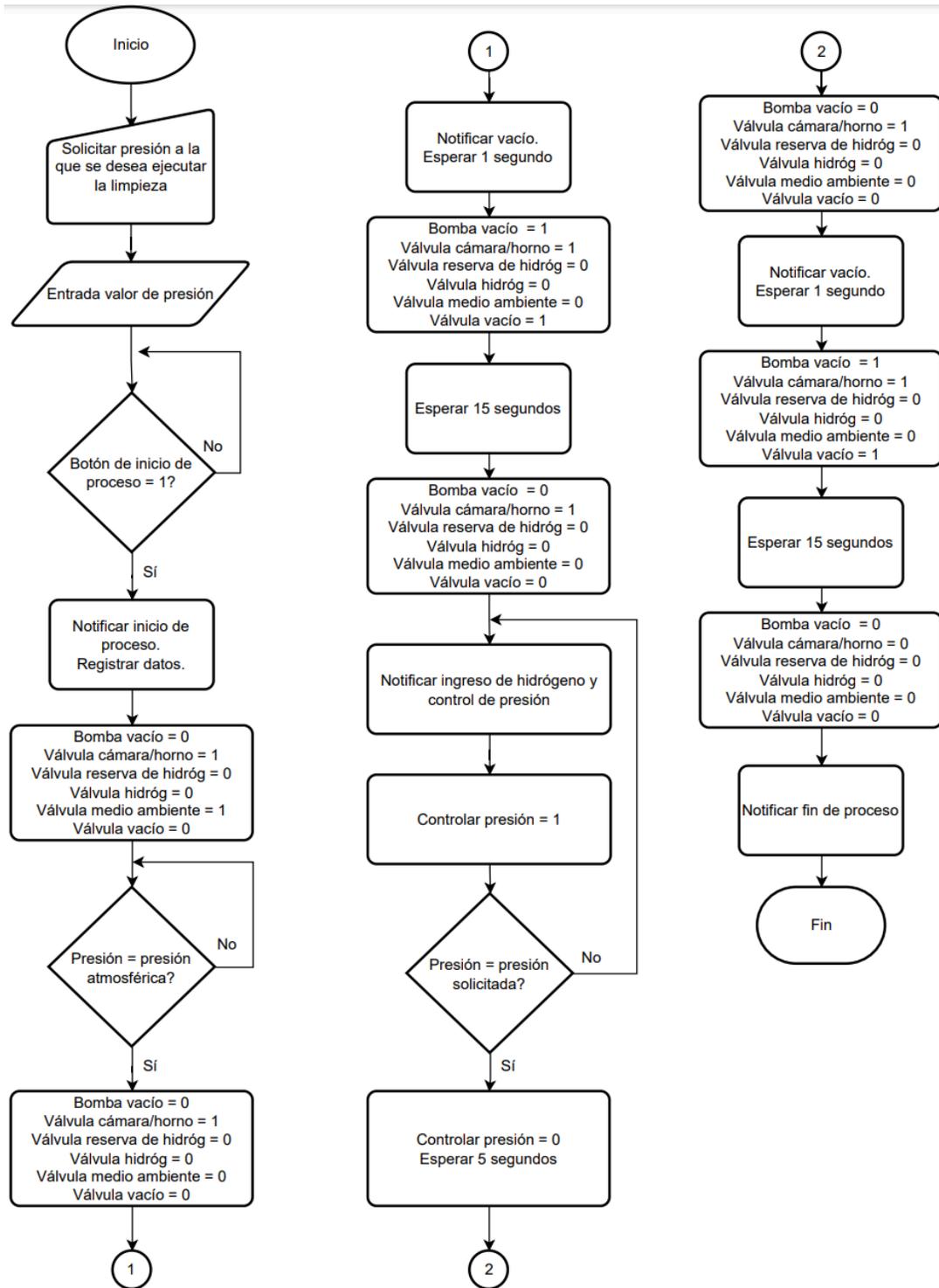


Fig. 33. Diagrama de flujo del proceso de purga del sistema.

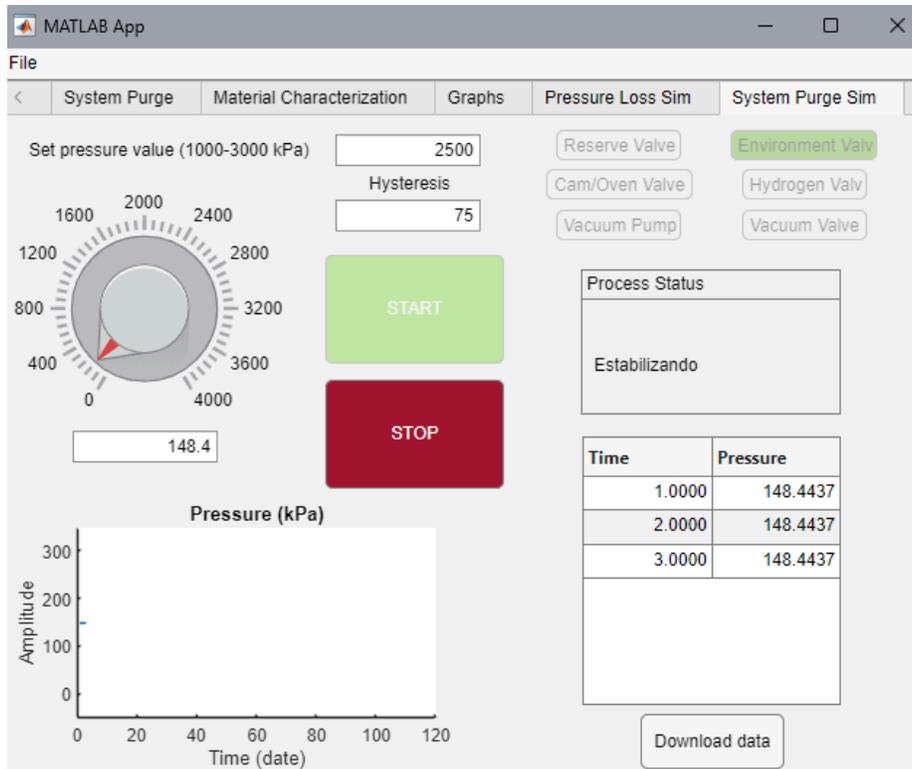


Fig. 34. Estabilizando a presión atmosférica para primer ciclo de vacío.

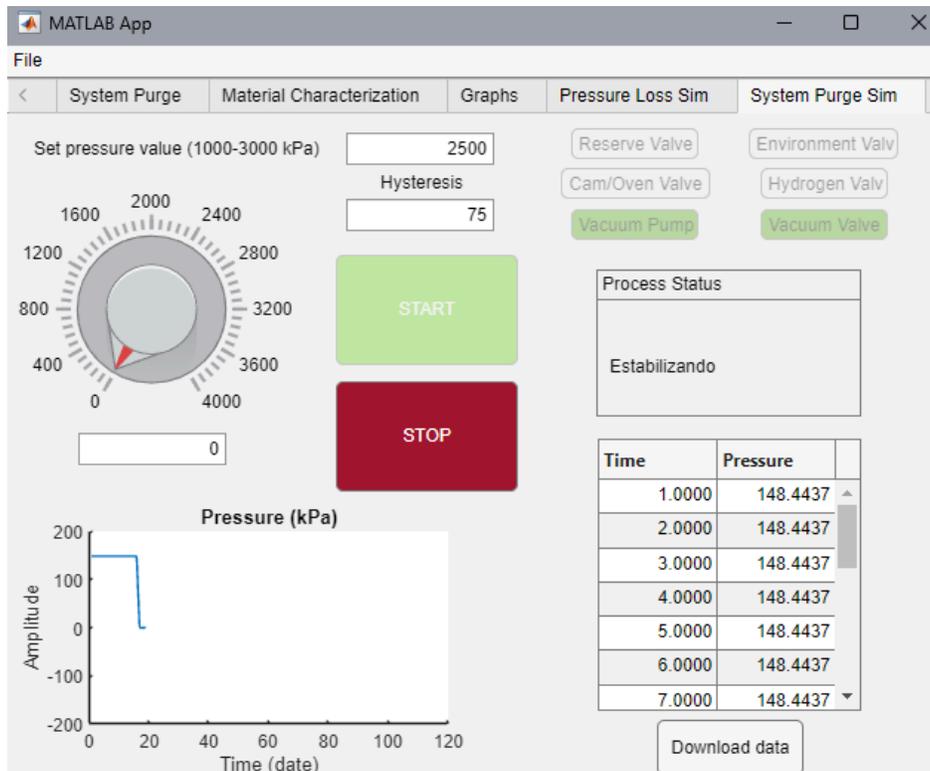


Fig. 35. Ejecución primer ciclo de vacío.

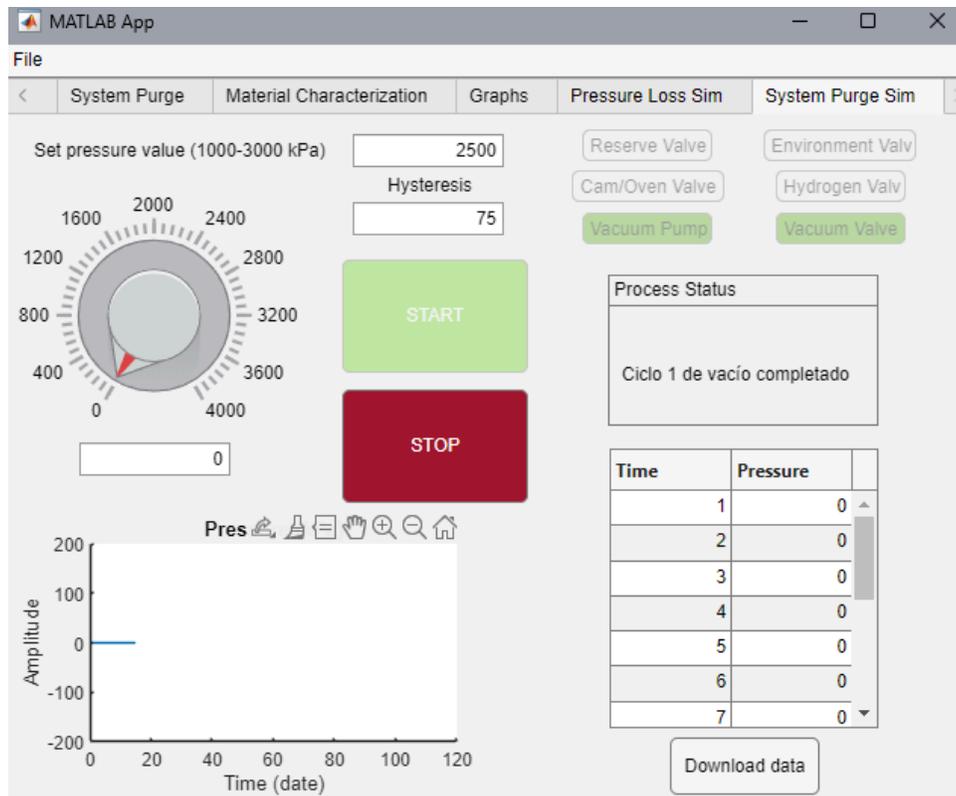


Fig. 36. Primer ciclo de vacío completado e inicio de estabilización de presión.

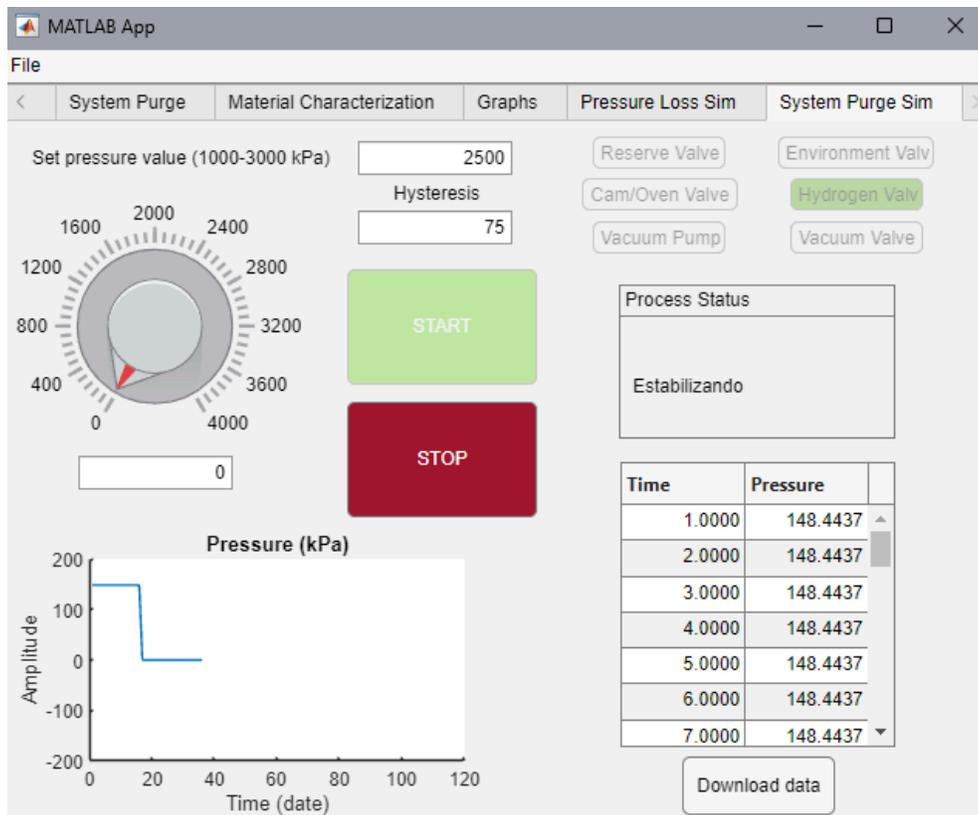


Fig. 37. Estabilización de presión.

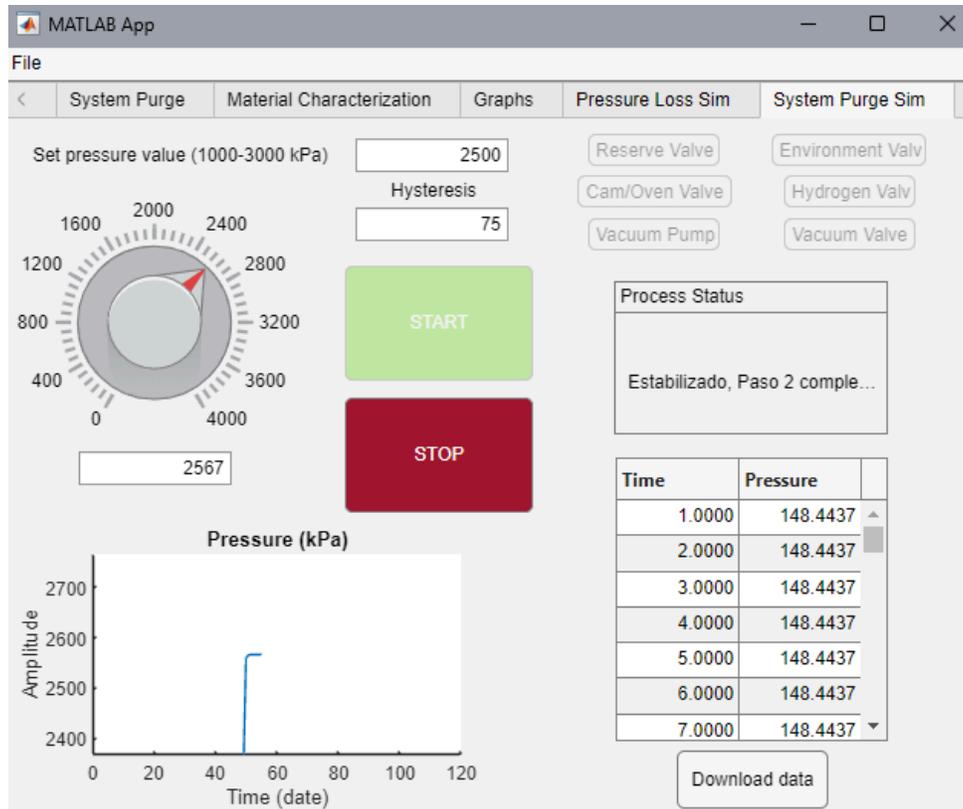


Fig. 38. Ingreso de presión si estuvo estable durante 5 segundos.

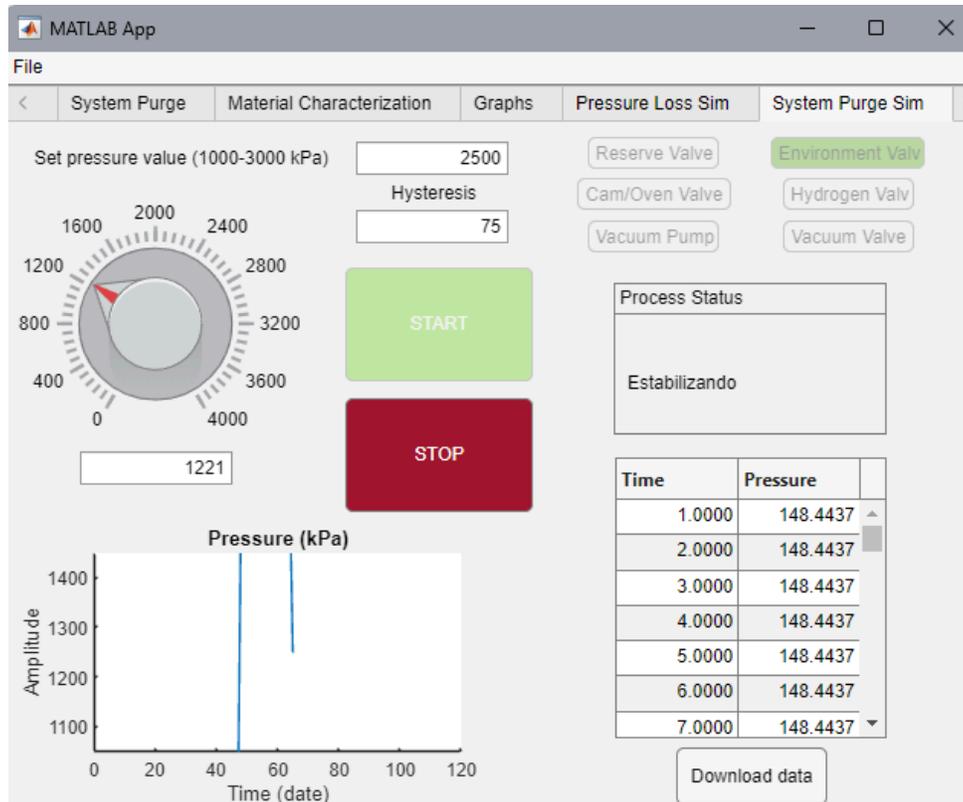


Fig. 39. Estabilización de sistema para segundo ciclo de vacío.

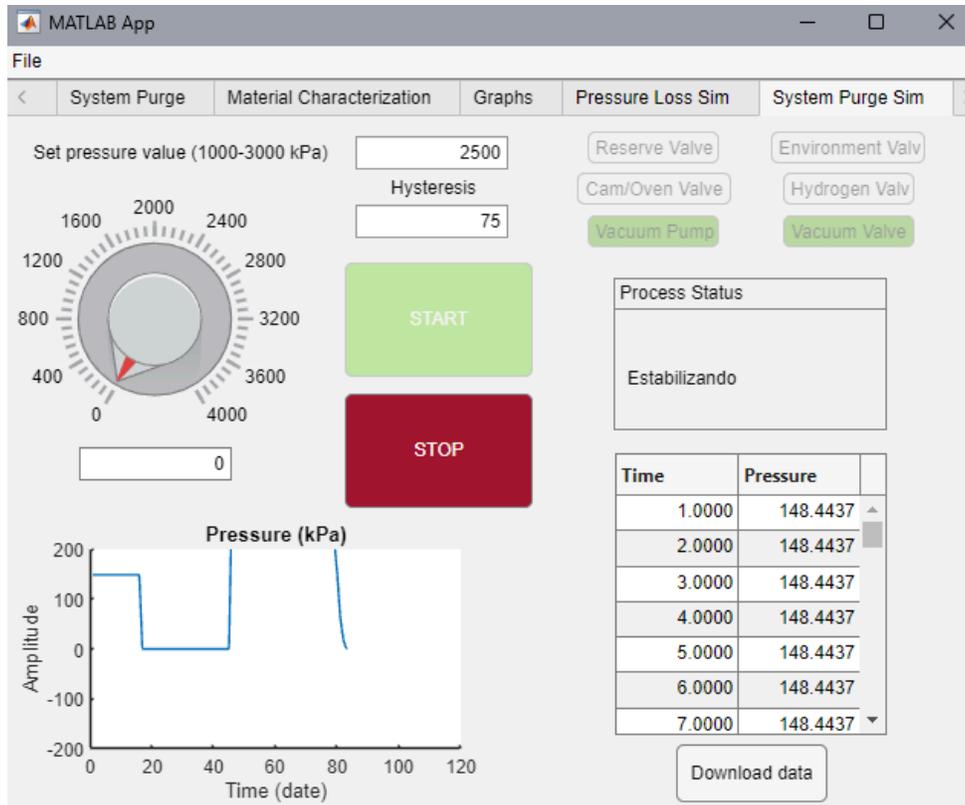


Fig. 40. Ejecución de segundo ciclo de vacío.

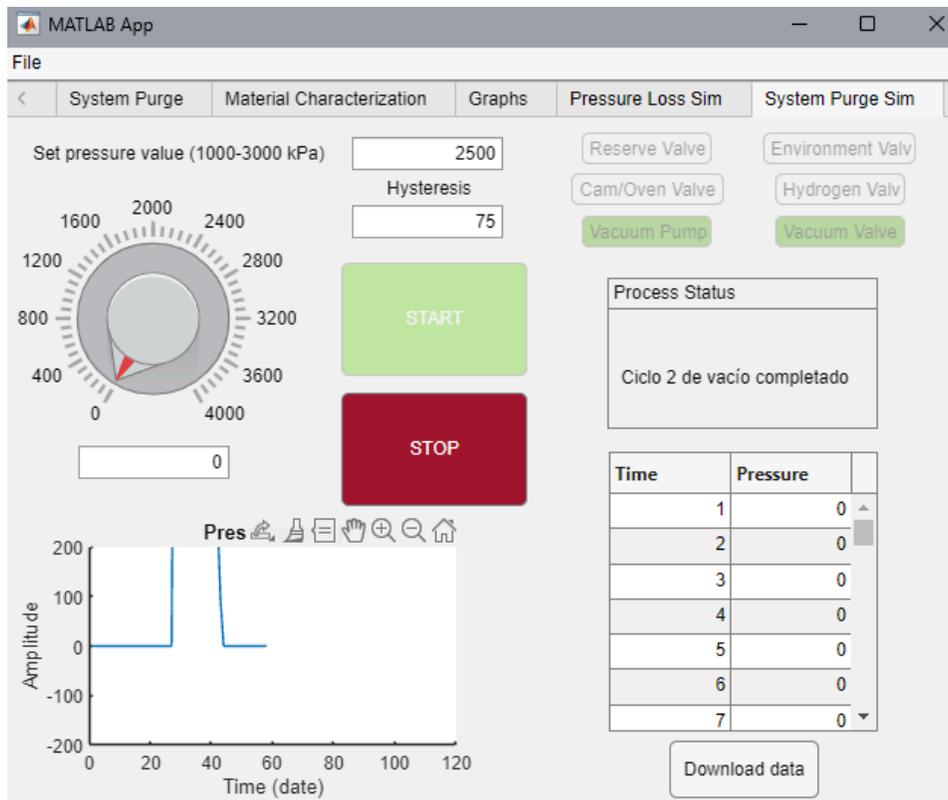


Fig. 41. Segundo ciclo de vacío completado.

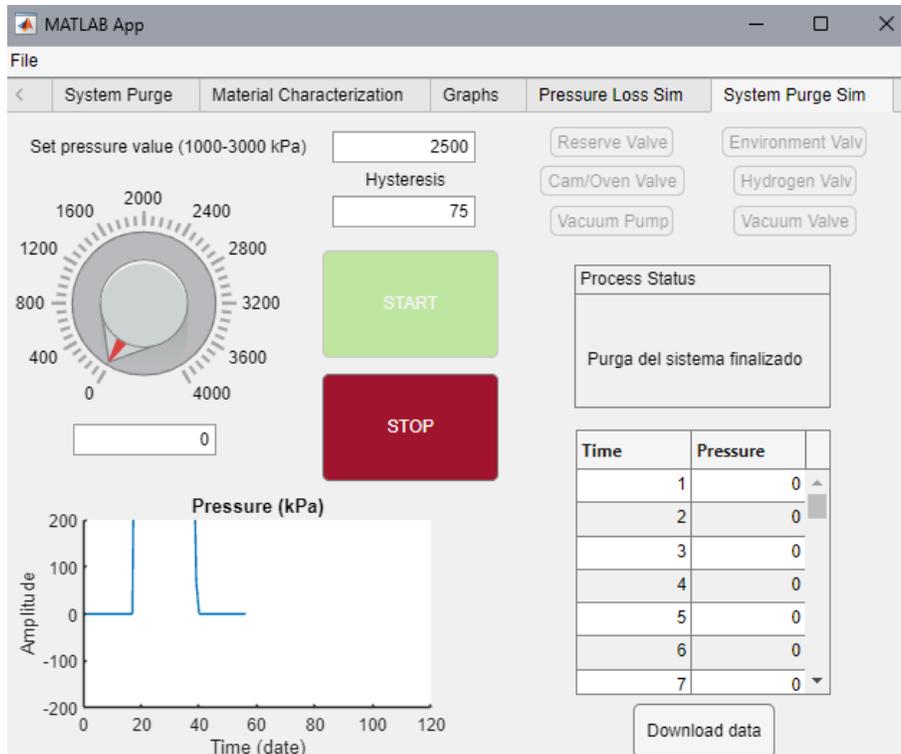


Fig. 42. Finalización de proceso.

Finalmente, si algún valor ingresado no es correcto para la ejecución de algún proceso, el sistema mostrará el siguiente mensaje.

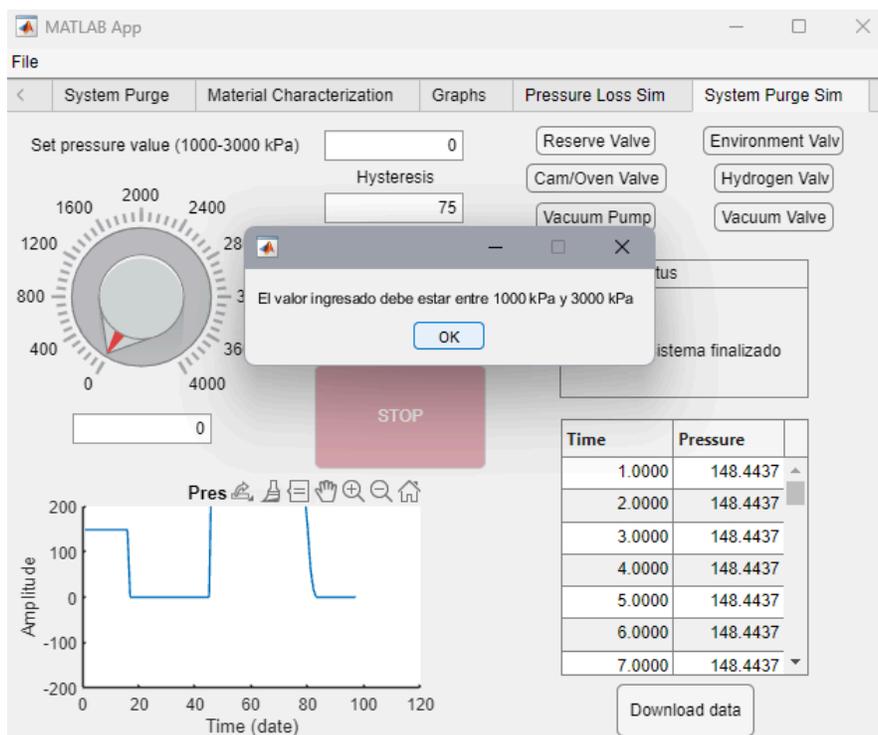
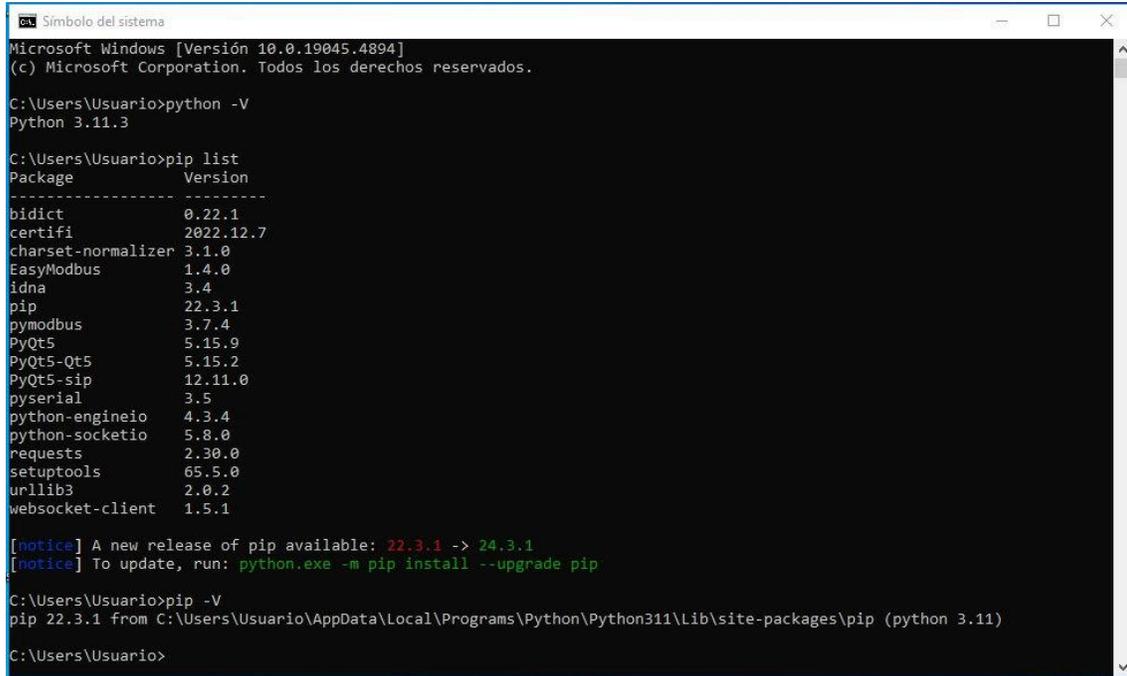


Fig. 43. Error en ingreso de parámetros.

## Requisitos de software

Se debe contar con python y MATLAB R2023b.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.4894]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Usuario>python -V
Python 3.11.3

C:\Users\Usuario>pip list
Package            Version
-----
bidict              0.22.1
certifi             2022.12.7
charset-normalizer 3.1.0
EasyModbus         1.4.0
idna                3.4
pip                 22.3.1
pymodbus           3.7.4
PyQt5              5.15.9
PyQt5-Qt5          5.15.2
PyQt5-sip          12.11.0
pyserial           3.5
python-engineio    4.3.4
python-socketio    5.8.0
requests           2.30.0
setuptools         65.5.0
urllib3            2.0.2
websocket-client   1.5.1

[notice] A new release of pip available: 22.3.1 -> 24.3.1
[notice] To update, run: python.exe -m pip install --upgrade pip

C:\Users\Usuario>pip -V
pip 22.3.1 from C:\Users\Usuario\AppData\Local\Programs\Python\Python311\Lib\site-packages\pip (python 3.11)

C:\Users\Usuario>
```

Fig. 43. Requisitos de python para la correcta ejecución de la aplicación.

# Apéndice H

## Informe de validación

# INFORME DE VALIDACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA PCT-SYSTEM-AUTO

## CONTENIDOS

<b>Pruebas de temperatura para validación de variabilidad de datos.</b>	<b>3</b>
Objetivo	3
Prueba #1	4
Prueba #2	5
Prueba #3	6
Prueba #4	7
Prueba #5	8
Prueba #6	9
Prueba #7	10
Prueba #8	11
Prueba #9	12
Prueba #10	13
Prueba #11	14
Variabilidad de resultados	15
<b>Pruebas de tiempo de respuesta de las válvulas.</b>	<b>17</b>
Objetivo	17
Pruebas a manifold	18
Configuración de osciloscopio	18
Ejecución de pruebas	19
Válvula Cámara/Horno	21
Válvula Medio Ambiente	25
Válvula Hidrógeno	29
Válvula Reserva	33
Válvula Vacío	37
Pruebas Adicionales	41
Pruebas de tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas.	43
<b>Pruebas de validación de respuesta del manifold ante simulación de presión.</b>	<b>45</b>
Pressure Loss	45
System Purge	50

### **Pruebas de temperatura para validación de variabilidad de datos.**

En todas las pruebas el valor objetivo para la cámara es 35 °C y para el horno es 150 °C. Debe dejarse enfriar luego de cada prueba. Antes de iniciar el proceso, los controladores deben estar configurados como se menciona en el manual de usuario.

1. Establecer valores a los que quiero ir e iniciar el proceso.
2. Esperar 12 horas.
3. Stop.
4. Descargar datos y revisar si se guardaron correctamente.
5. Mover data y renombrar en otra carpeta para exportar y/o graficar.
6. Repetir proceso para las demás pruebas.

#### **Objetivo**

Obtener coeficiente de variación promedio de los datos (solo en la sección estable).

**Prueba #1**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 20 °C

Oven: 20 °C

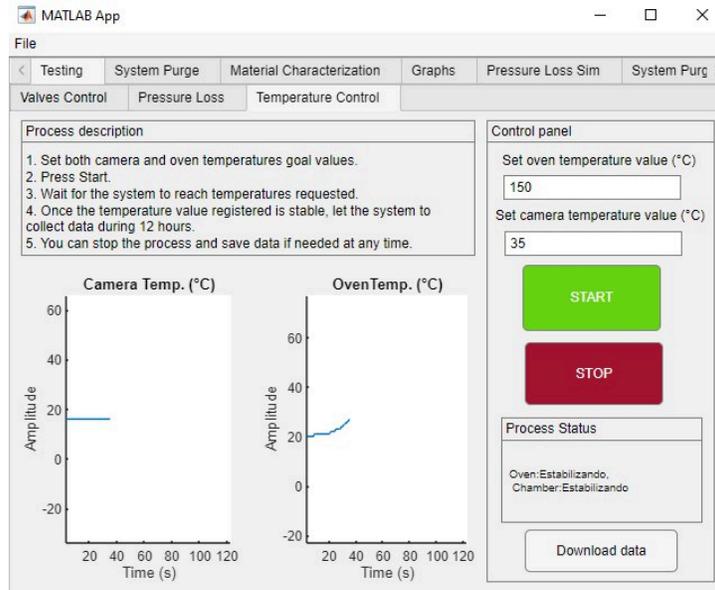


Fig. 1. Ejecución prueba 1.



Fig. 2. Resultados prueba 1; temperatura en cámara.

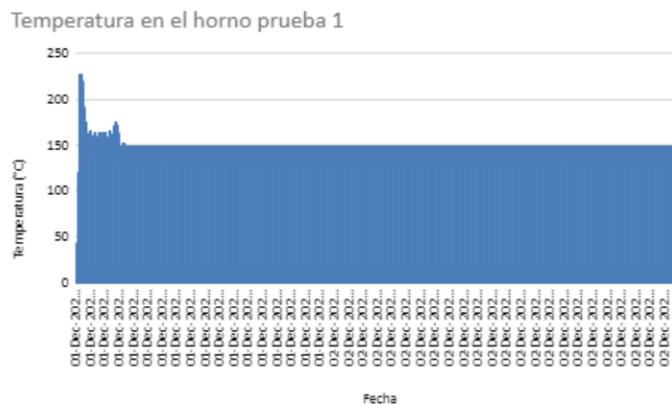


Fig. 3. Resultados prueba 1; temperatura en horno.

### Prueba #2

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 19 °C

Oven: 20 °C

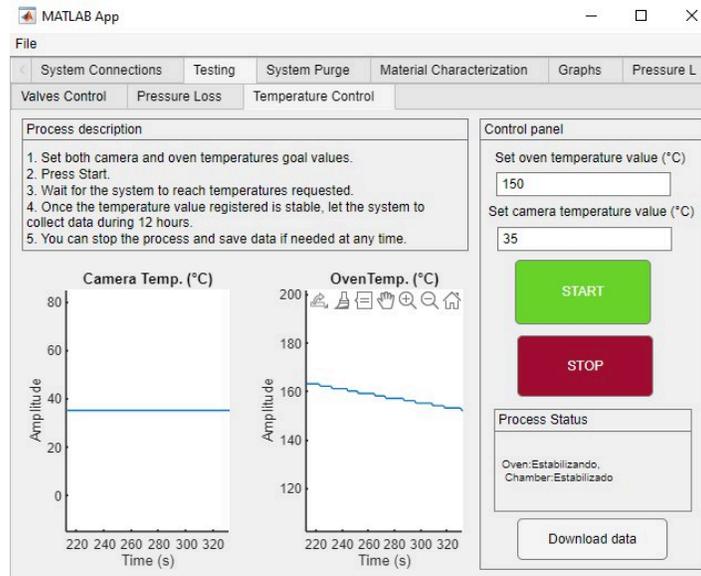


Fig. 4. Ejecución prueba 2.



Fig. 5. Resultados prueba 2; temperatura en cámara.



Fig. 6. Resultados prueba 2; temperatura en horno.

**Prueba #3**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 19 °C

Oven: 20 °C

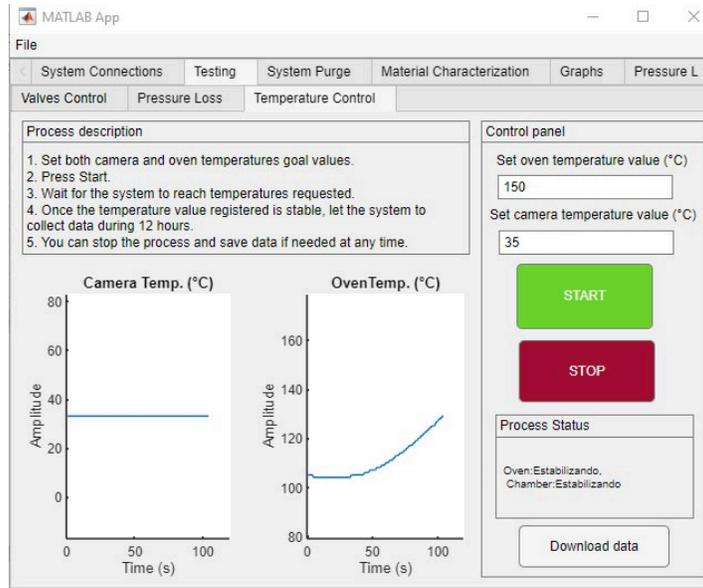


Fig. 7. Ejecución prueba 3.



Fig. 8. Resultados prueba 3; temperatura en cámara.



Fig. 9. Resultados prueba 3; temperatura en horno.

**Prueba #4**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 19 °C

Oven: 20 °C

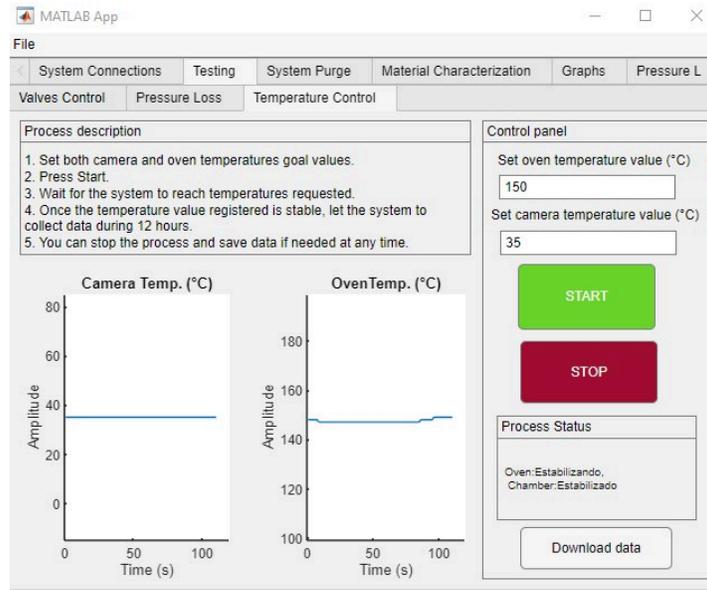


Fig. 10. Ejecución prueba 4.



Fig. 11. Resultados prueba 4; temperatura en cámara.



Fig. 12. Resultados prueba 4; temperatura en horno.

**Prueba #5**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 17 °C

Oven: 20 °C

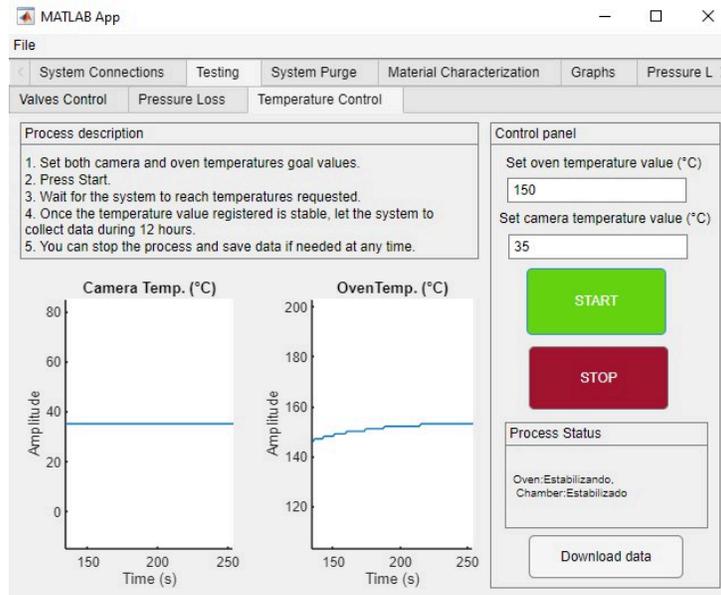


Fig. 13. Ejecución prueba 5.



Fig. 14 Resultados prueba 5; temperatura en cámara.



Fig. 15. Resultados prueba 5; temperatura en horno.

**Prueba #6**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 19 °C

Oven: 20 °C

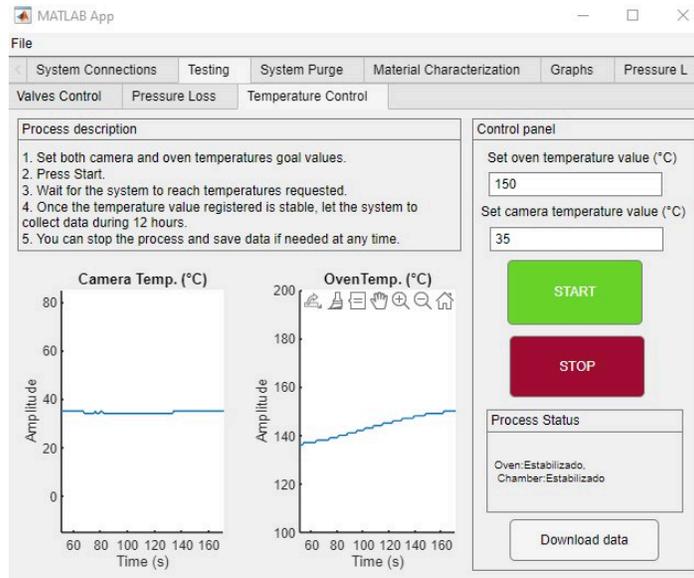


Fig. 16. Ejecución prueba 6.



Fig. 17. Resultados prueba 6; temperatura en cámara.



Fig. 18. Resultados prueba 6; temperatura en horno.

**Prueba #7**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 17 °C

Oven: 20 °C

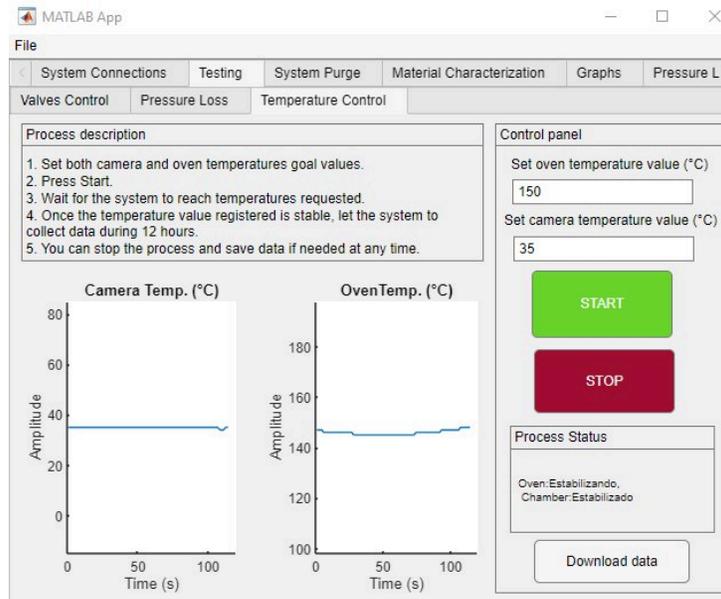


Fig. 19. Ejecución prueba 7.

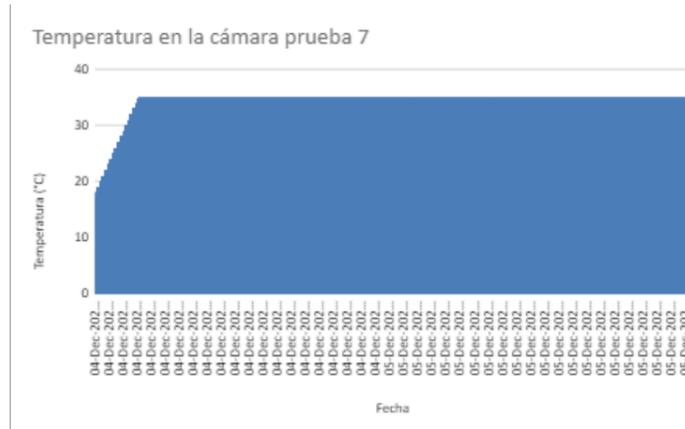


Fig. 20. Resultados prueba 7; temperatura en cámara.



Fig. 21. Resultados prueba 7; temperatura en horno.

**Prueba #8**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 17 °C

Oven: 20 °C

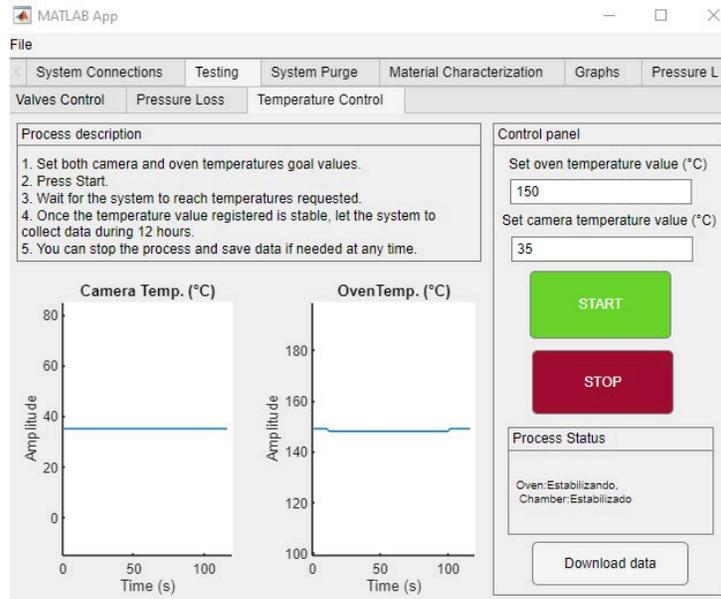


Fig. 22. Ejecución prueba 8.

Temperatura en la cámara prueba 8

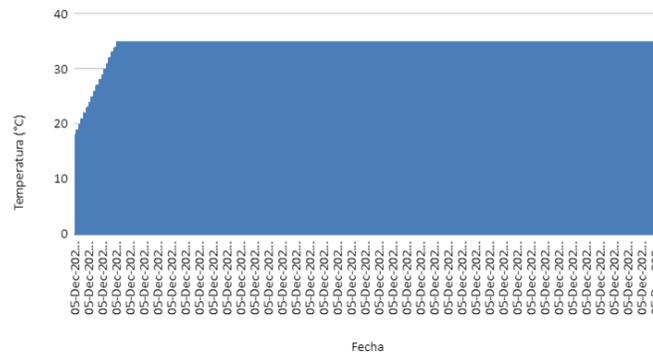


Fig. 23. Resultados prueba 8; temperatura en cámara.

Temperatura en el horno prueba 8

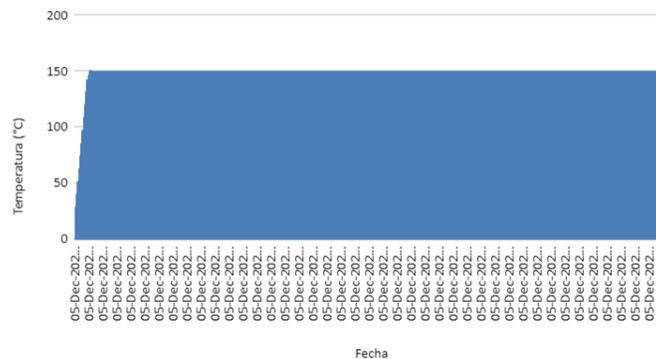


Fig. 24. Resultados prueba 8; temperatura en horno.

**Prueba #9**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 17 °C

Oven: 20 °C

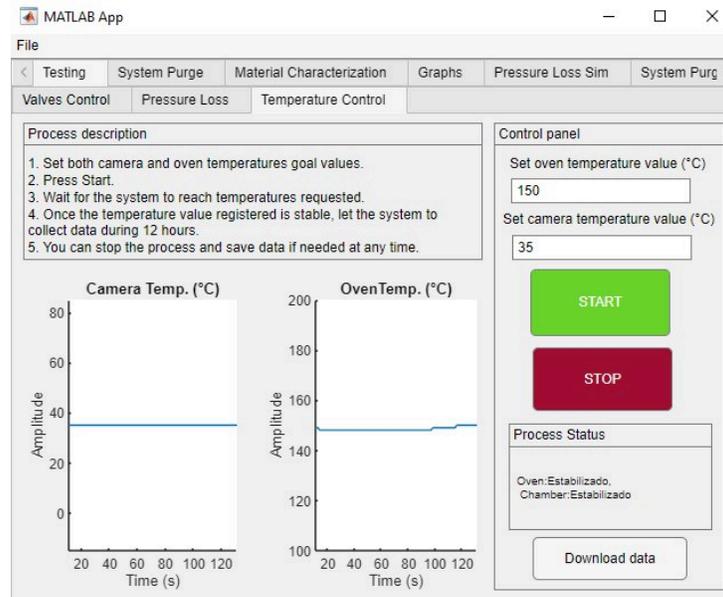


Fig. 25. Ejecución prueba 9.

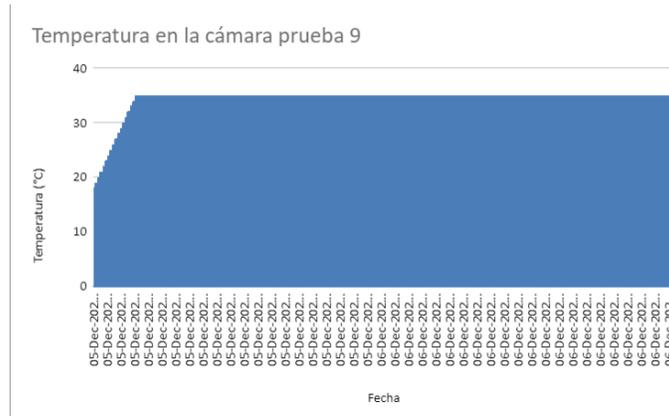


Fig. 26. Resultados prueba 9; temperatura en cámara.

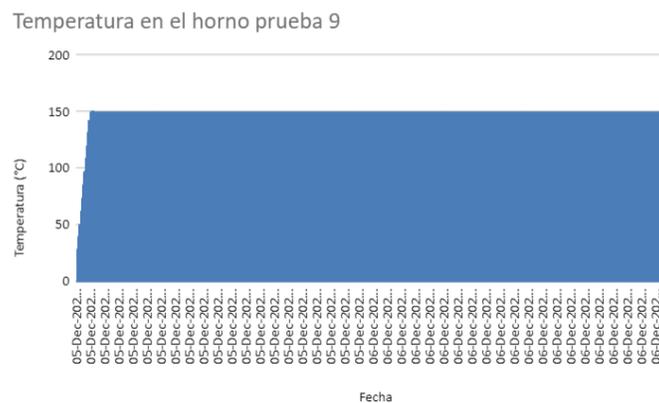


Fig. 27. Resultados prueba 9; temperatura en horno.

### Prueba #10

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 16 °C

Oven: 20 °C

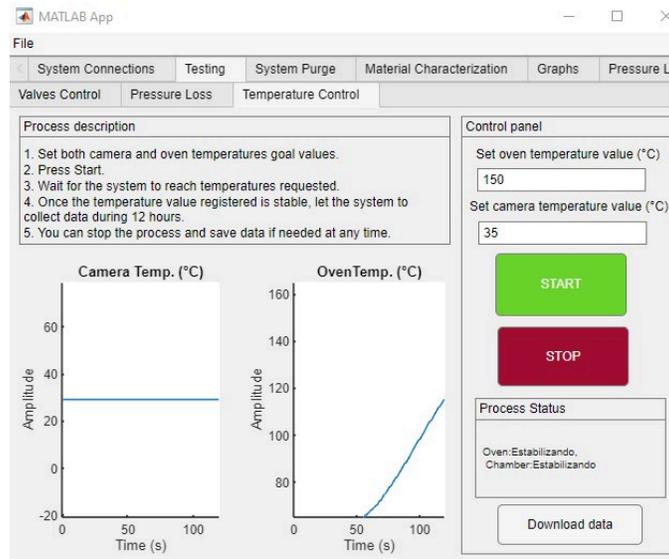


Fig. 28. Ejecución prueba 10.

Temperatura en la cámara prueba 10

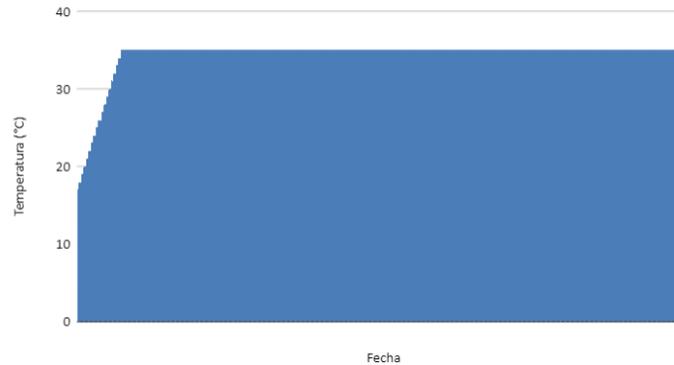


Fig. 29. Resultados prueba 10; temperatura en cámara.

Temperatura en el horno prueba 10

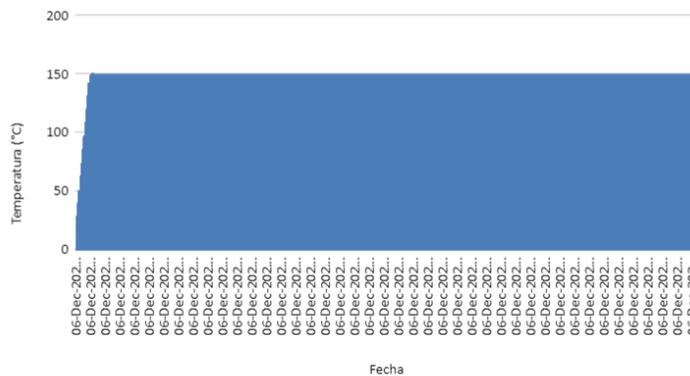


Fig. 30. Resultados prueba 10; temperatura en horno.

**Prueba #11**

Temperaturas iniciales en sistema

Cam: 16 °C

Oven: 20 °C

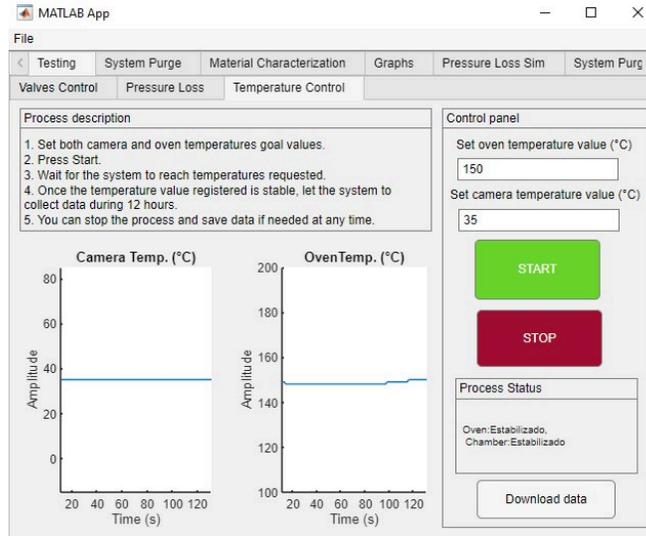


Fig. 31. Ejecución prueba 11.

Temperatura en la cámara prueba 11

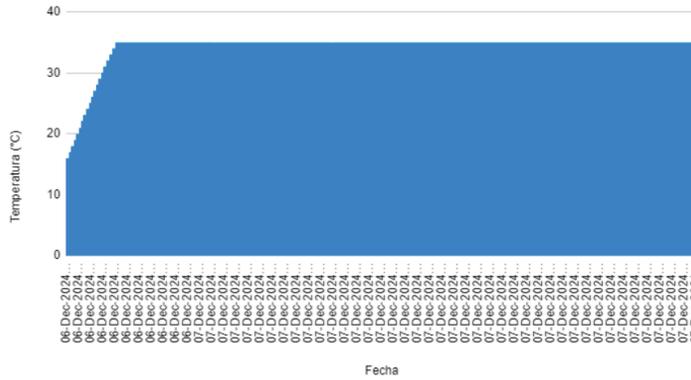


Fig. 32. Resultados prueba 11; temperatura en cámara.

Temperatura en horno prueba 11

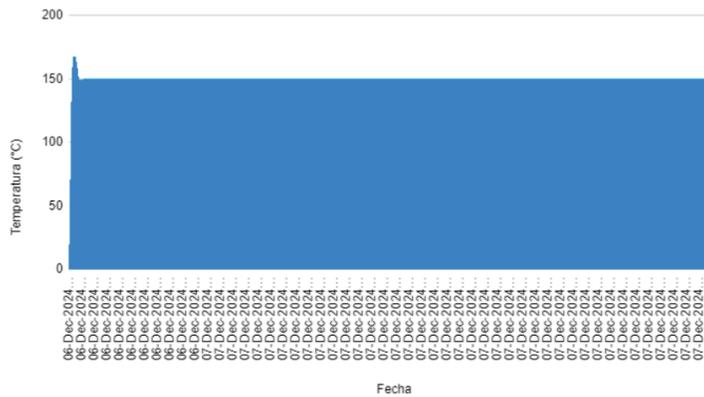


Fig. 33. Resultados prueba 11; temperatura en horno.

En todas las pruebas, la gráfica en la sección final de la prueba se observó de la siguiente forma.

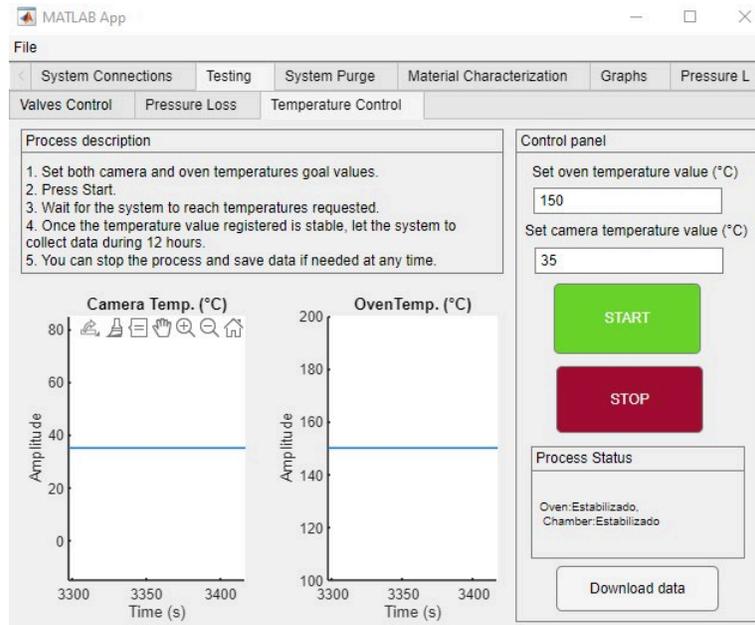


Fig. 34. Finalización de proceso de control de temperatura.

### Variabilidad de resultados

Analizando los resultados, se concluye que 1 hora es suficiente para que la temperatura en la cámara y el horno se estabilicen. Por lo tanto, para calcular la variabilidad de los resultados, se analizarán los datos que estén después de esta hora, aproximadamente a partir de la fila 3400.

En la Tabla 1 se encuentran los cálculos del coeficiente de variación (variabilidad) para los datos obtenidos en cada prueba. Además, se muestra el cálculo de la variabilidad del sistema en cuanto al control de temperatura. El cálculo de la media se realiza con la ecuación 1. El cálculo de la desviación estándar se realiza con la ecuación 2 y el coeficiente de variación se calcula con la ecuación 3.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$DE = \sqrt{\frac{\sum |x - \mu|^2}{N}} \quad (2)$$

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

Tabla 1. Resultados de variabilidad de los datos de temperatura.

Variabilidad de resultados en control de temperatura				
Número de prueba	Métrica	Media	Desviación Estándar	Coficiente de variación
Prueba 1	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150.0005	2.13%	1.42%
Prueba 2	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	149.9996	2.07%	1.38%
Prueba 3	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
Prueba 4	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
Prueba 5	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
Prueba 6	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
Prueba 7	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.71%	0.47%
Prueba 8	Temperatura en cámara	35	0.00%	0.00%
	Temperatura en horno	150	0.00%	0.00%
Prueba 9	Temperatura en cámara	34.9999	0.71%	2.03%
	Temperatura en horno	150	0.50%	0.33%
Prueba 10	Temperatura en cámara	34.9999	1.00%	2.86%
	Temperatura en horno	150	0.50%	0.33%
Prueba 11	Temperatura en cámara	35	0.50%	1.43%
	Temperatura en horno	149.9996	2.01%	1.34%
Promedio variabilidad				0.53%

## Pruebas de tiempo de respuesta de las válvulas.

Se utilizó un osciloscopio BK Precision 2532 para la obtención del tiempo de respuesta de la electroválvula del manifold.

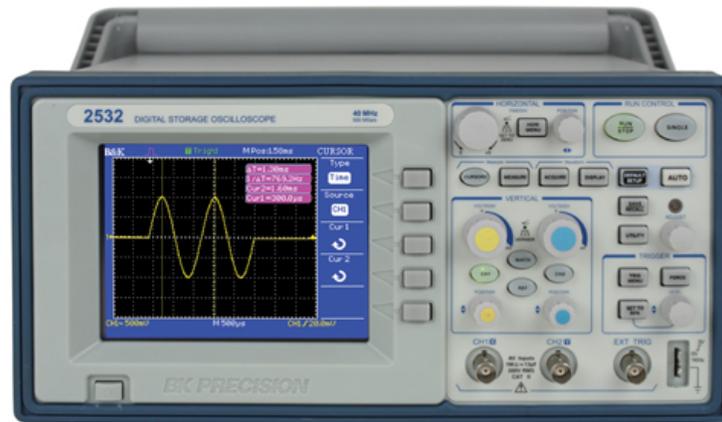


Fig. 35. Osciloscopio BK Precision 2532.

Para la respuesta de las válvulas neumáticas se utilizó el sensor de flujo FESTO SFAH-50V-G18FS-PNLK-PNVBA-M8



Fig. 36. Sensor de flujo FESTO SFAH-50V-G18FS-PNLK-PNVBA-M8.

### Objetivo

Obtener el tiempo de respuesta promedio de las válvulas del sistema, desde el momento en el que se activa la señal en la interfaz de control hasta la apertura o cierre de la válvula neumática.

## Pruebas a manifold

### Configuración de osciloscopio

Se toma señal canal 1 baja potencia sonda x1 y se toma señal canal 2 alta potencia sonda en x10.

- Paso 1: Verificar las sondas
  - Configurar interruptor de sonda canal 1 en X1
  - Configurar interruptor de sonda canal 2 en X10 : Esto es crucial para manejar señales de alto voltaje.
- Paso 2: Conectar las sondas al osciloscopio
  - Canal 1 (señal de inicio):
    - Conectar la primera sonda al conector BNC del Canal 1.
  - Canal 2 (señal de respuesta):
    - Repetir el proceso anterior con la segunda sonda en el conector BNC del Canal 2.
- Paso 3: Conectar sondas al Arduino y a electroválvula
  - Canal 1 (señal de inicio):
    - Conectar la sonda al pin del Arduino que activa el relé.
    - Usar el clip de tierra de la sonda conectado al GND del Arduino.
  - Canal 2 (señal de respuesta):
    - Conectar la sonda al punto donde se genera la señal de control de 110VAC al manifold (después del relé).
    - Asegurarse de que el clip de tierra esté conectado al neutro.
- Paso 4: Encender y configurar en el menú del osciloscopio
  - Canal 1 (señal de inicio):
    - Configurar el canal 1 en acoplamiento DC.
    - Seleccionar 1X en el ajuste de la sonda en atenuación.
  - Canal 2 (señal de respuesta):
    - Configurar el canal 2 en acoplamiento AC.
    - Seleccionar 10X en atenuación.
- Paso 5: Configurar las escalas iniciales
  - Canal 1 (señal de inicio):
    - Volt/Div: Ajustar a 2V/div.
  - Canal 2 (señal de respuesta):
    - Volt/Div: Ajustar a 50V/div.
  - Time/Div:
    - Usar una base de tiempo de 10 ms/div.
- Paso 6: Configurar el disparo (Trigger)
  - Configurar el disparo en borde (Edge).
  - Seleccionar el Canal 1 como fuente de disparo.
  - Ajustar el nivel del disparo en aproximadamente 50% del valor pico esperado.

### Ejecución de pruebas

Tomar señal de encendido y señal de apagado, 11 veces para cada botón (5 botones, 5 válvulas).

1. Activar señal (apagar o encender válvula)
2. Pausar osciloscopio.
3. Ajustar escalas de la gráfica en osciloscopio (volt/div y ms/div).
4. Usar los cursores del osciloscopio para calcular tiempo de respuesta.
  - Colocar el primer cursor en el flanco ascendente de la señal del Canal 1 (inicio).
  - Colocar el segundo cursor en el inicio de la señal de 110VAC en el Canal 2 (respuesta).
  - La diferencia entre los cursores es el tiempo de respuesta.
5. Capturar imagen.
6. Reanudar toma de datos en osciloscopio y repetir para las otras válvulas.

La gráfica de activación debe mostrar un cambio en el momento en el que se activa la válvula en la interfaz. Debe haber un cambio de 0 V a 5 V o viceversa. (5 V si está apagada y 0 V si está encendida; lógica inversa en señales de control por limitaciones del módulo de relays). La gráfica de respuesta debe mostrar 0 VAC antes del encendido y 110 VAC luego de la activación.

Se obtuvieron resultados variando el ms/div con el fin de observar la respuesta de diferentes formas. Se observa en cada imagen la escala utilizada. Por limpieza de la imagen, se desactivaron los cursores a la hora de la captura, sin embargo, en la Tabla 2 se encuentran los datos recopilados y en la Figura 98 se presenta una imagen donde se observan los cursores mencionados. Las conexiones físicas se encuentran en las Figuras 37, 38 y 39.



Fig. 37. Conexión sonda de baja potencia.

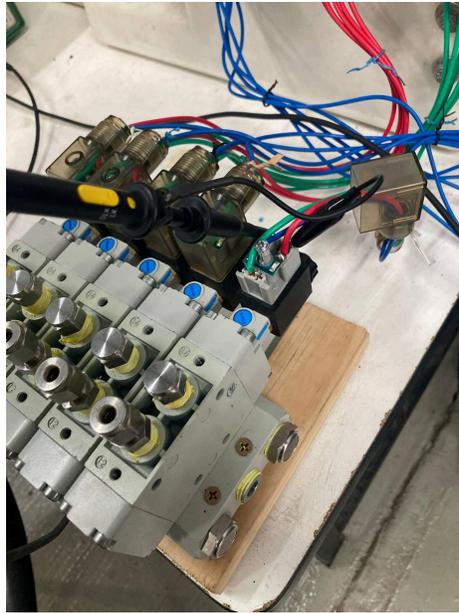


Fig. 38. Conexión sonda de alta potencia.

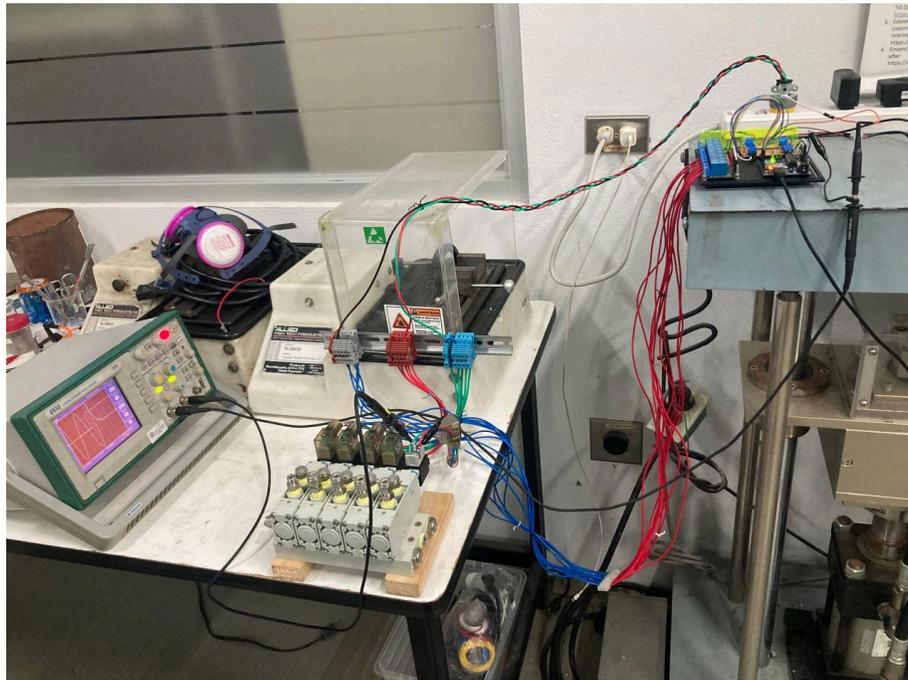


Fig. 39. Conexión del sistema para prueba de tiempo de respuesta de electroválvula.

**Válvula Cámara/Horno**

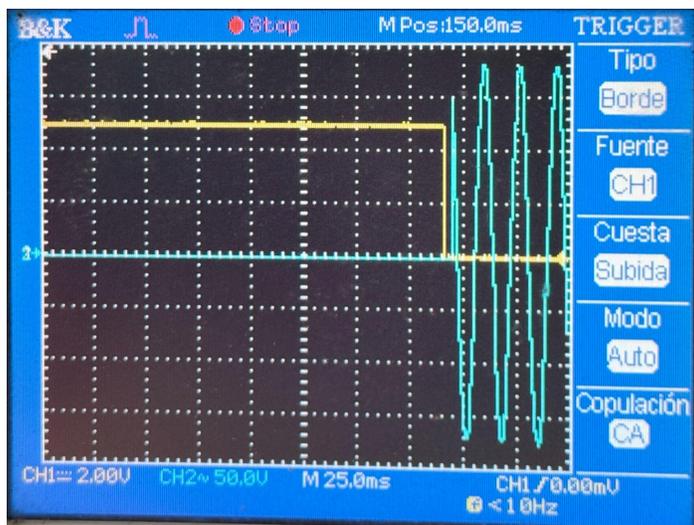


Fig. 40. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 1.

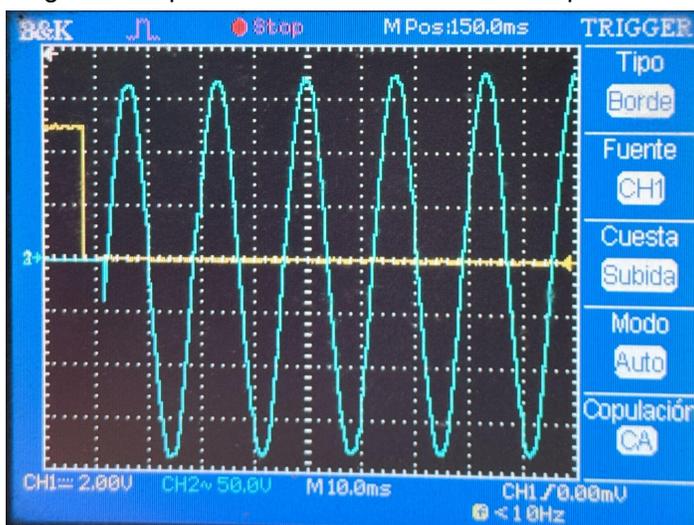


Fig. 41. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 2.

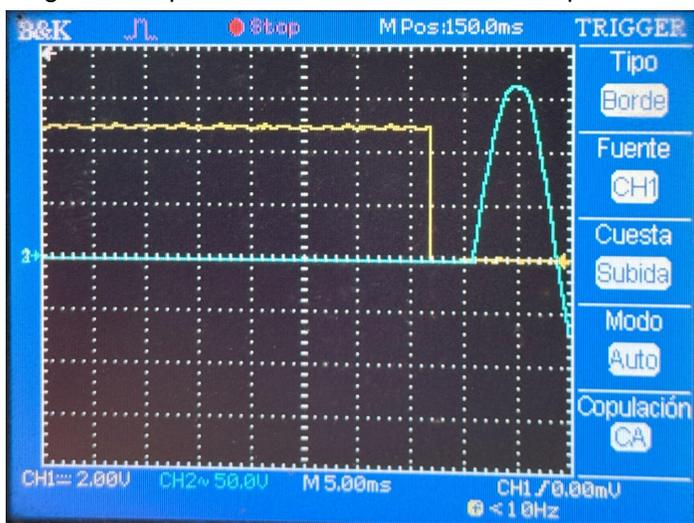


Fig. 42. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 3.

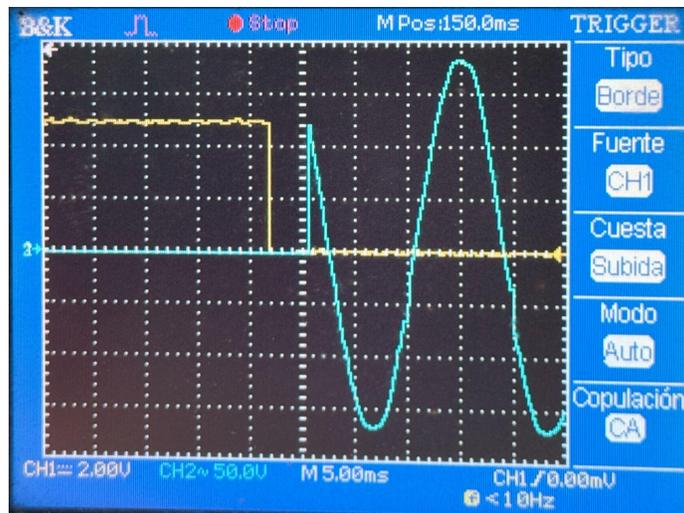


Fig. 43. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 4.

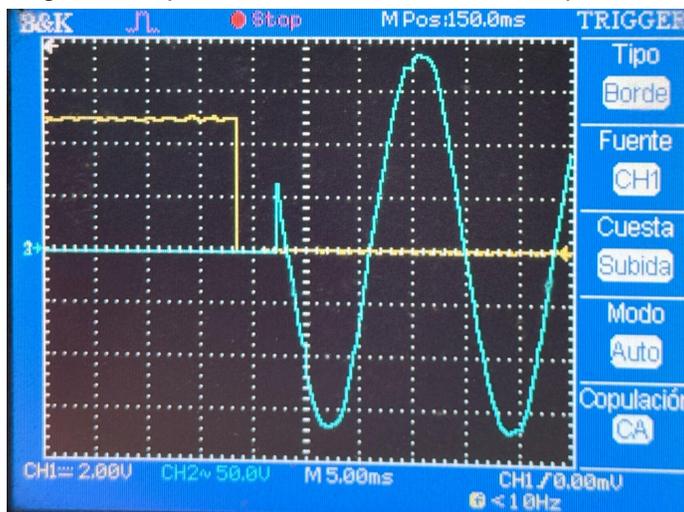


Fig. 44. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 5.

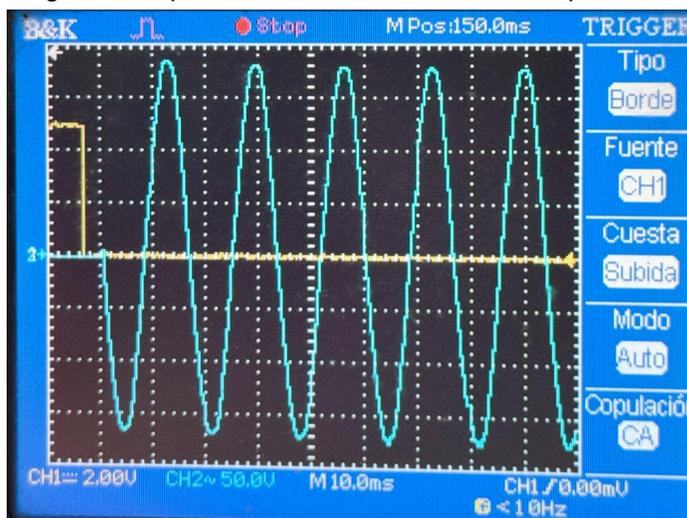


Fig. 45. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 6.

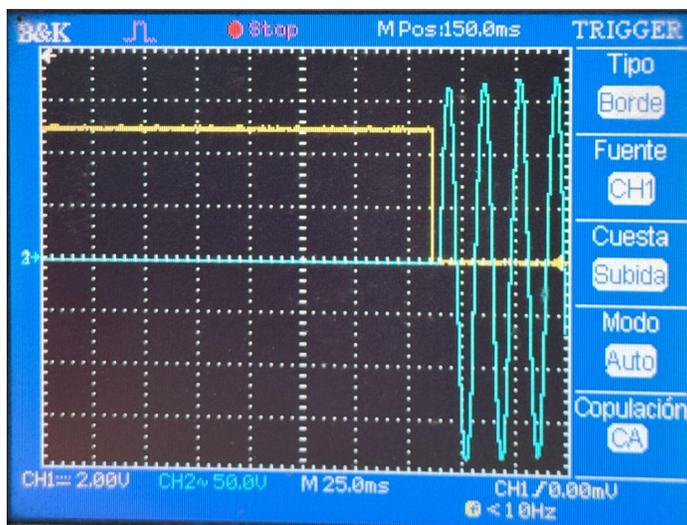


Fig. 46. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 7.

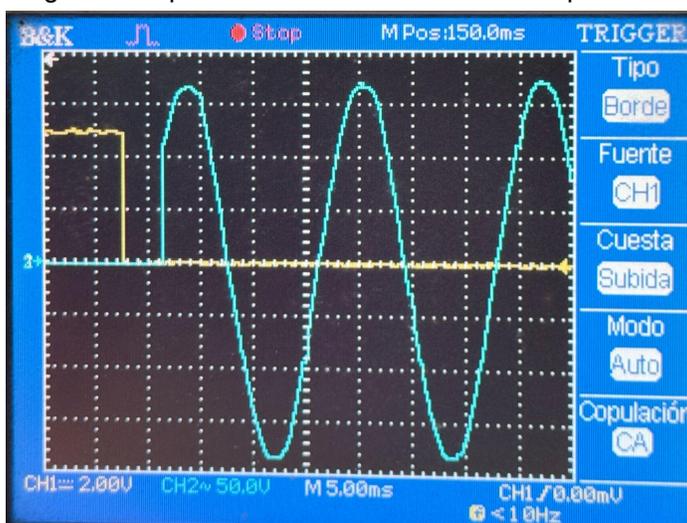


Fig. 47. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 8.

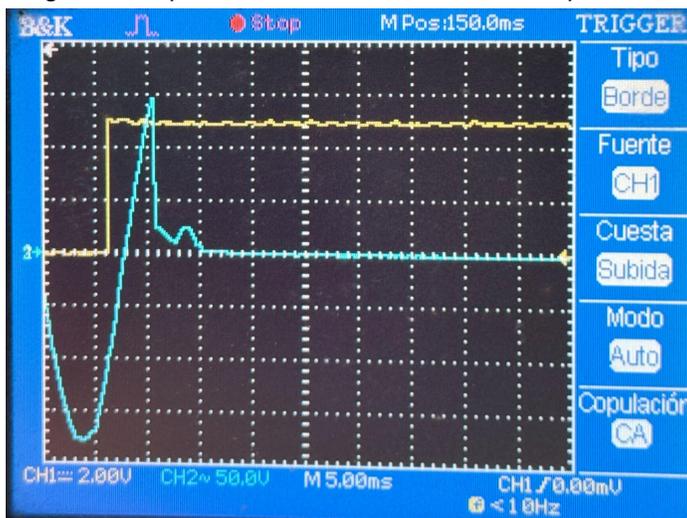


Fig. 48. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 9.

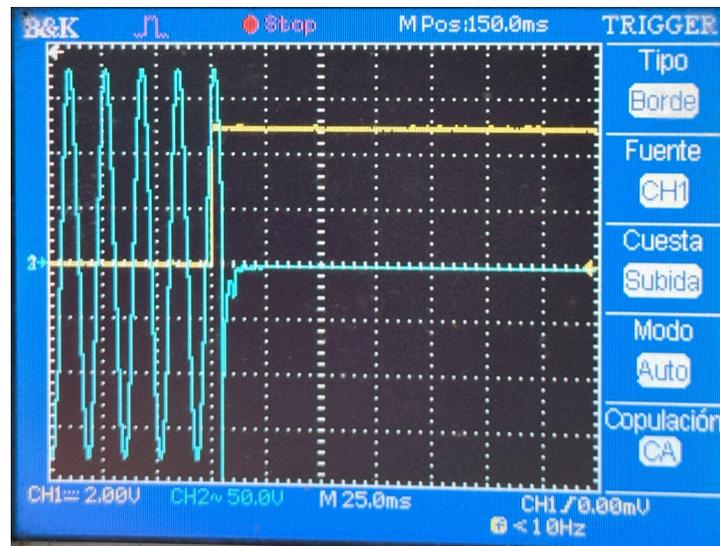


Fig. 49. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 10.

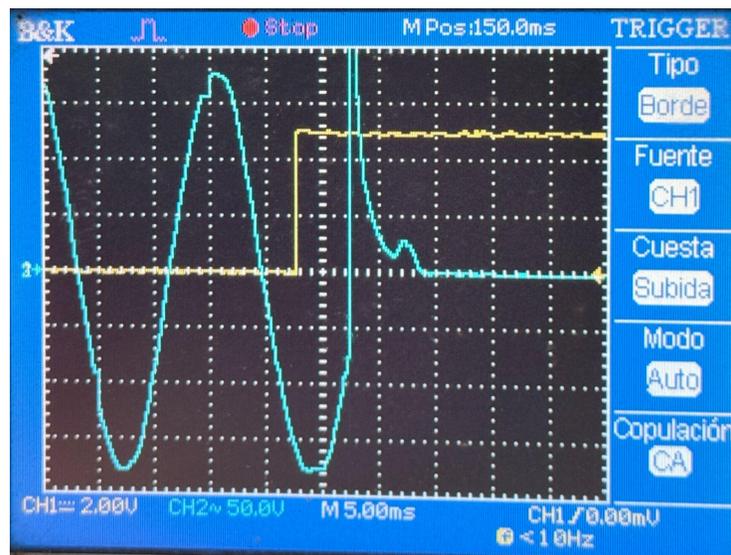


Fig. 50. Respuesta de válvula cámara/horno prueba 11.

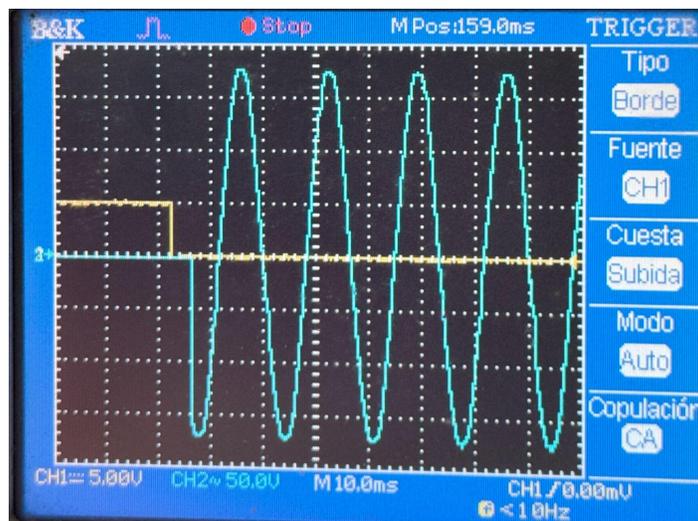
**Válvula Medio Ambiente**

Fig. 51. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 1.



Fig. 52. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 2.

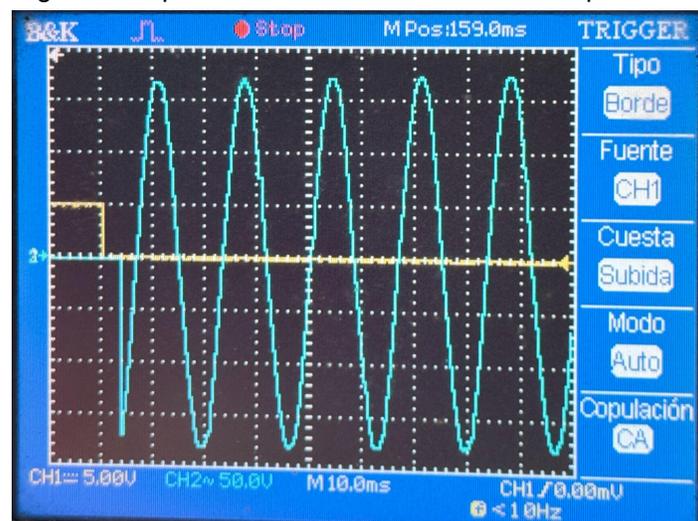


Fig. 53. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 3.

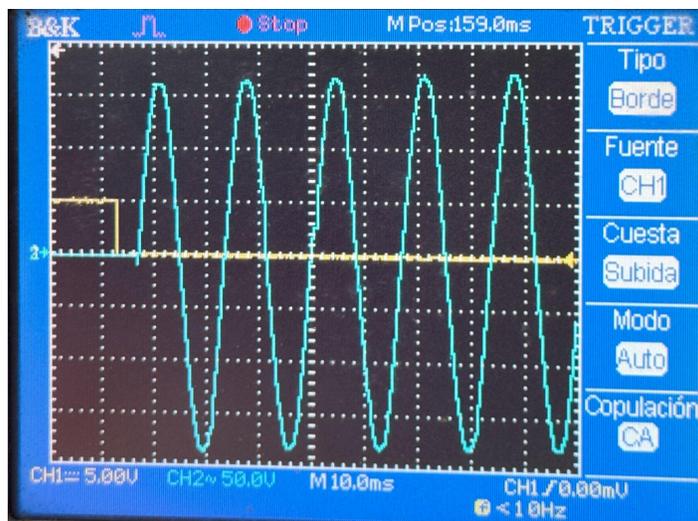


Fig. 54. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 4.

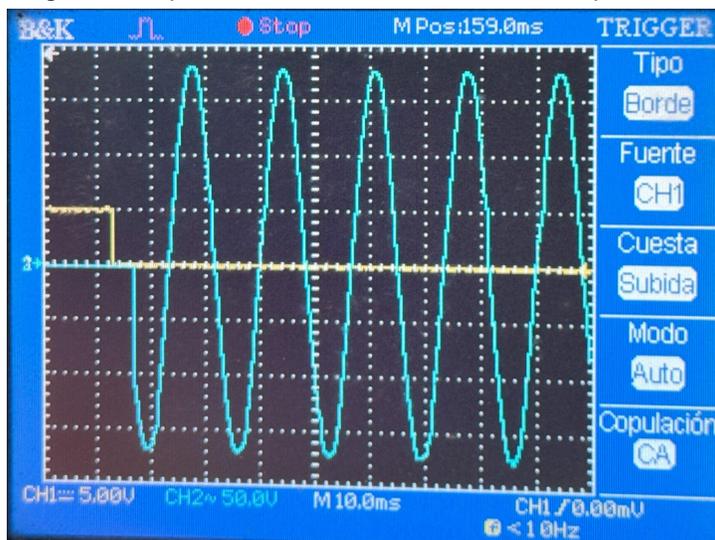


Fig. 55. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 5.



Fig. 56. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 6.

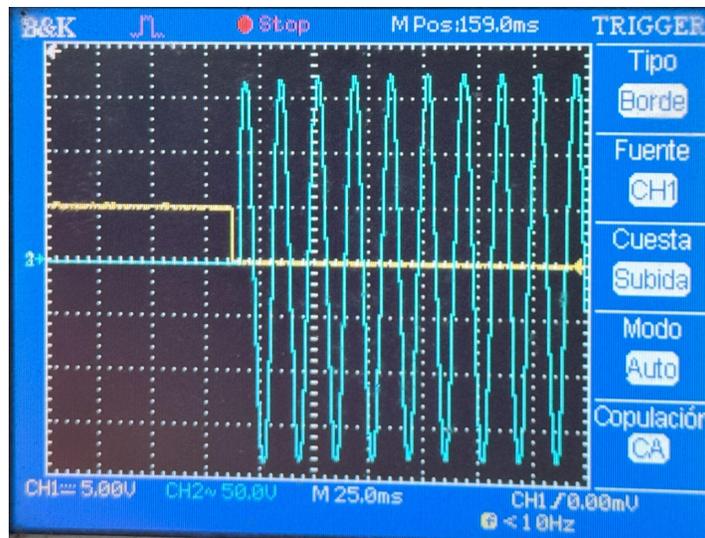


Fig. 57. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 7.

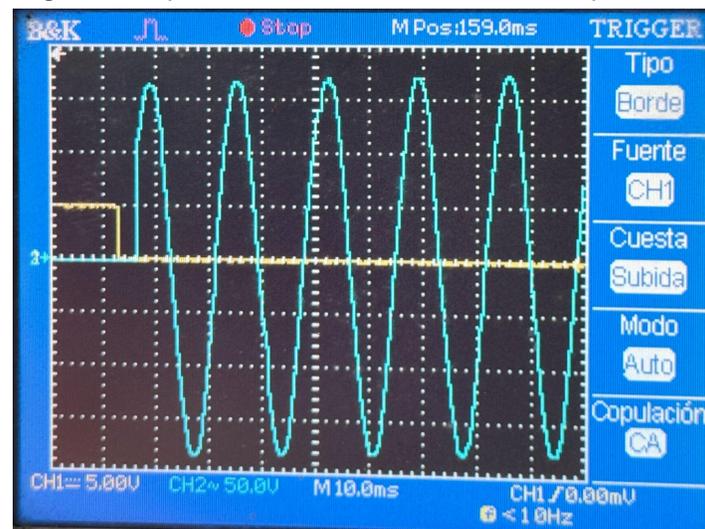


Fig. 58. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 8.

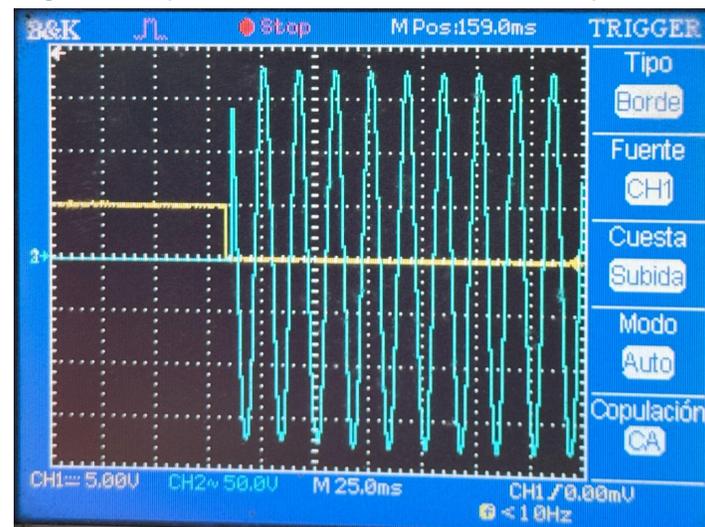


Fig. 59. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 9.

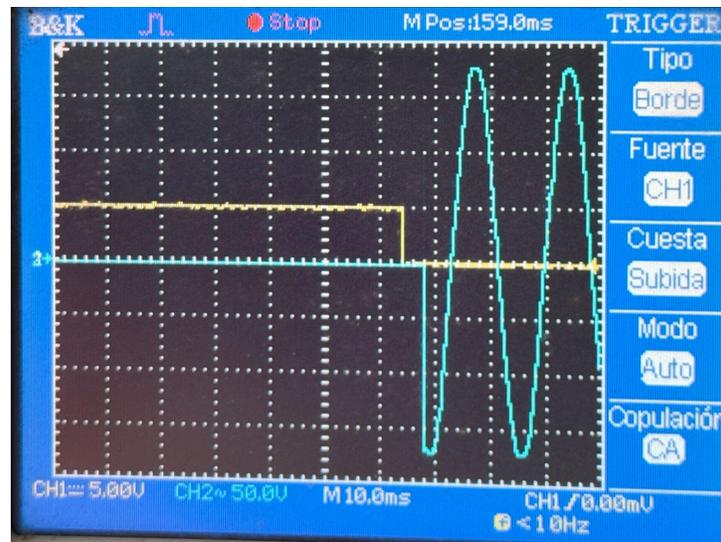


Fig. 60. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 10.

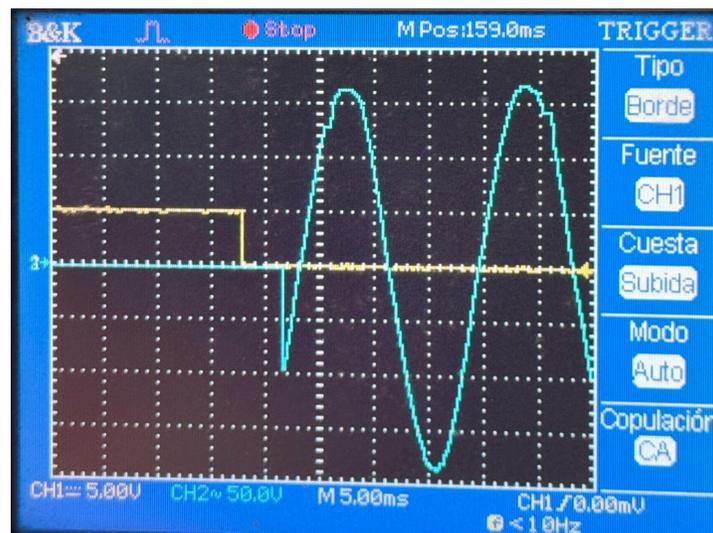


Fig. 61. Respuesta de válvula medio ambiente prueba 11.

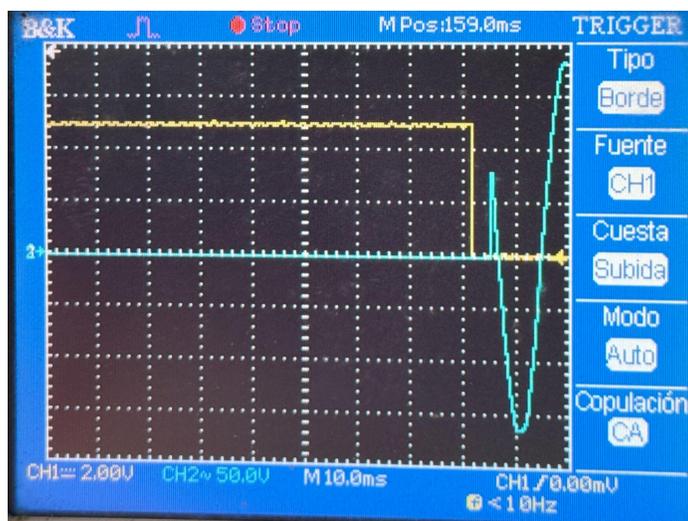
**Válvula Hidrógeno**

Fig. 62. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 1.

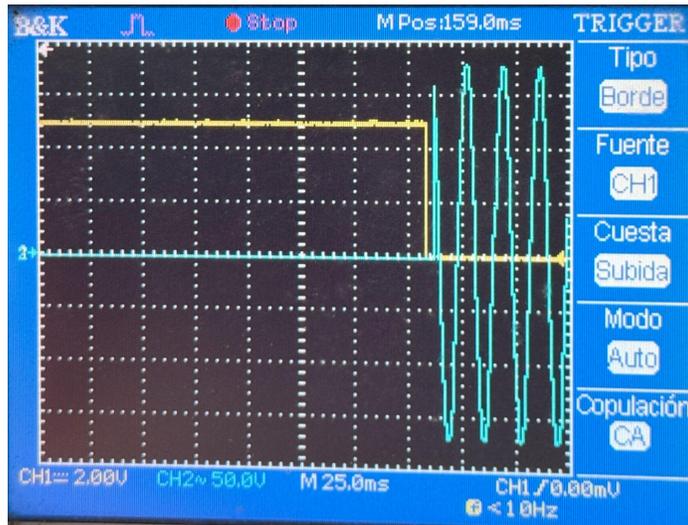


Fig. 63. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 2.

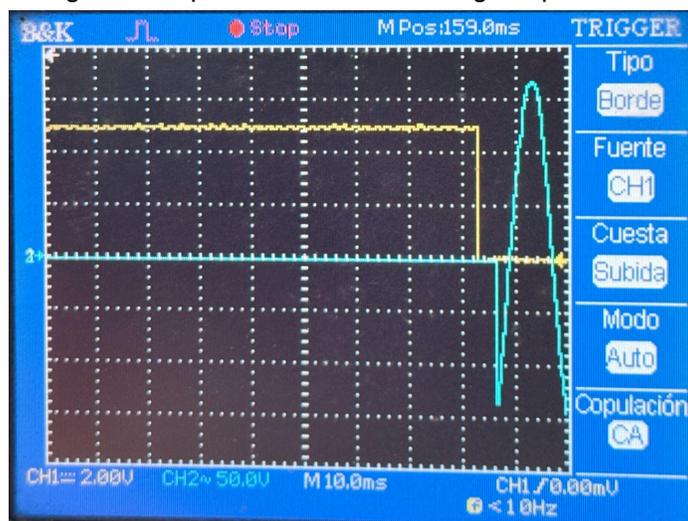


Fig. 64. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 3.

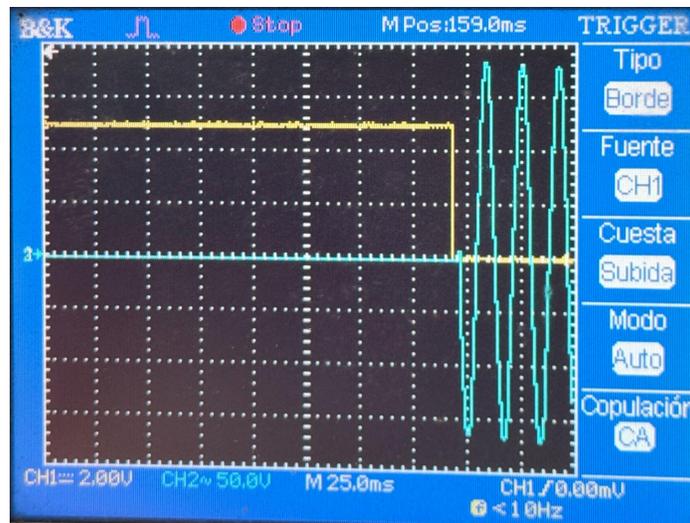


Fig. 65. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 4.

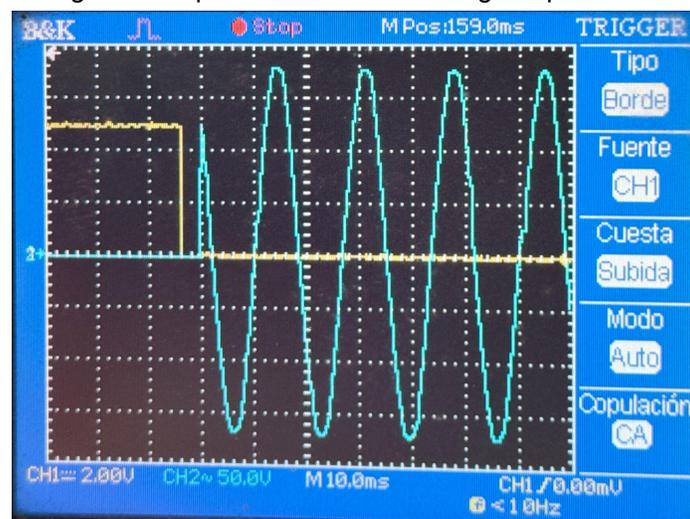


Fig. 66. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 5.

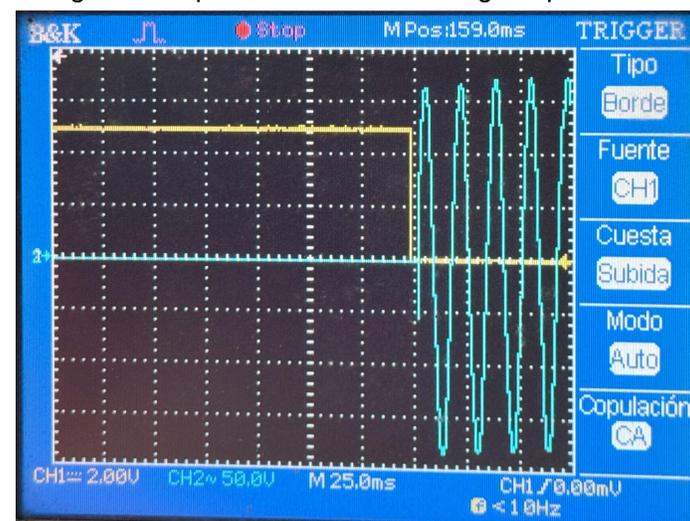


Fig. 67. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 6.

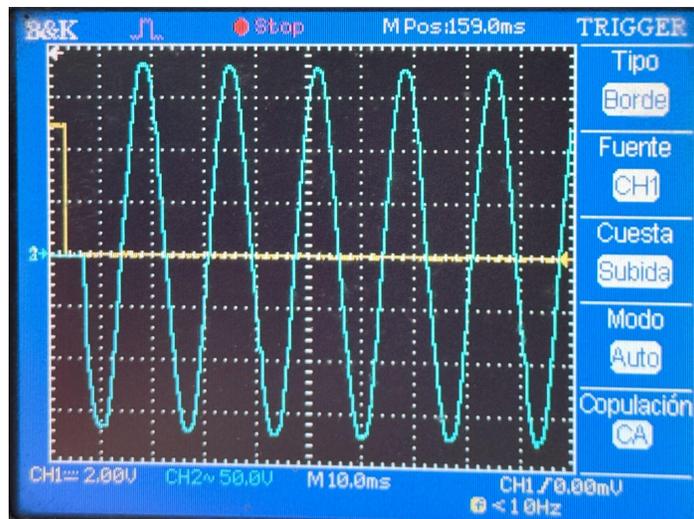


Fig. 68. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 7.

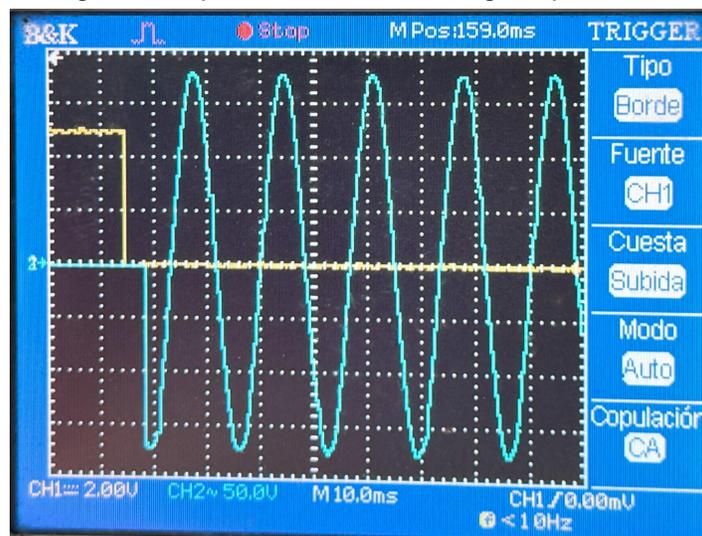


Fig. 69. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 8.

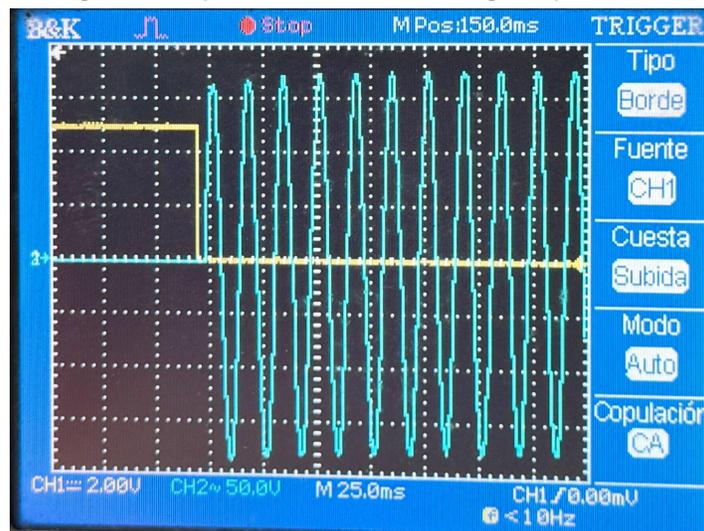


Fig. 70. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 9.

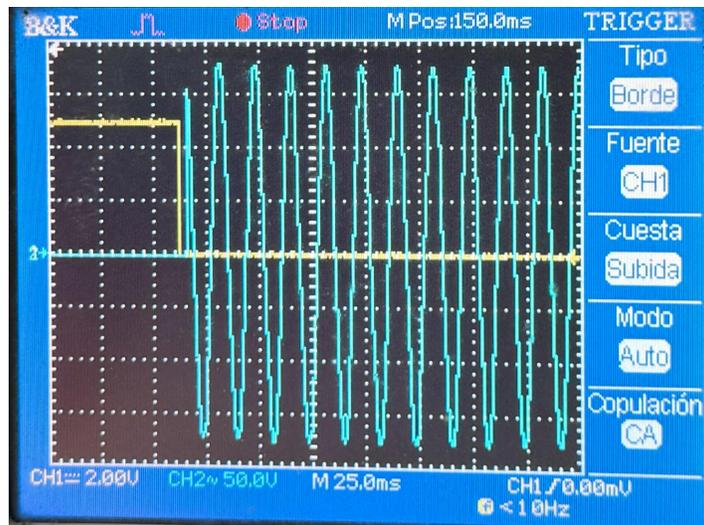


Fig. 71. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 10.

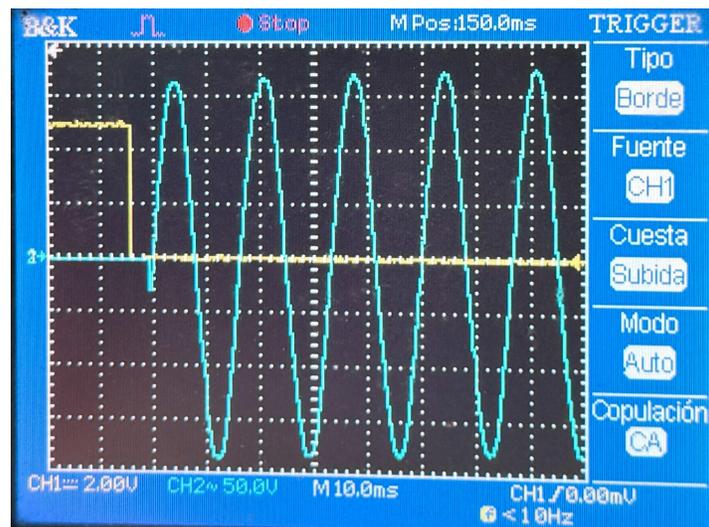


Fig. 72. Respuesta de válvula hidrógeno prueba 11.

**Válvula Reserva**

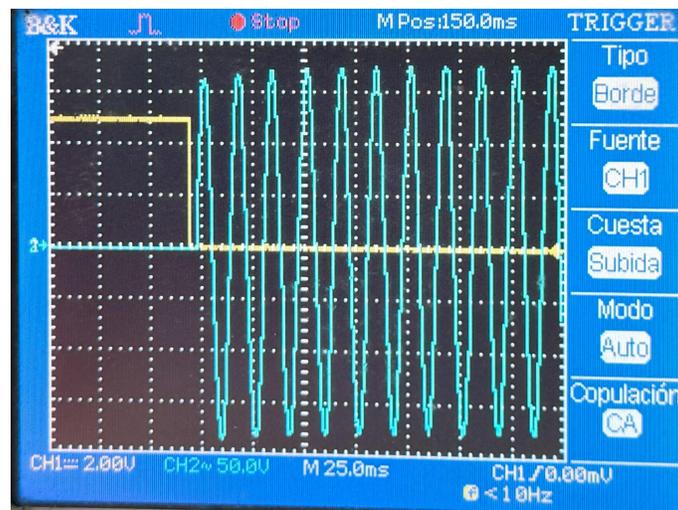


Fig. 73. Respuesta de válvula reserva prueba 1.

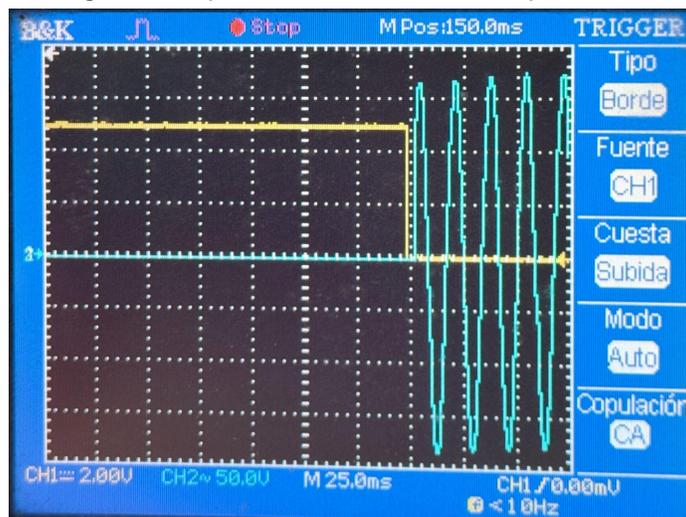


Fig. 74. Respuesta de válvula reserva prueba 2.

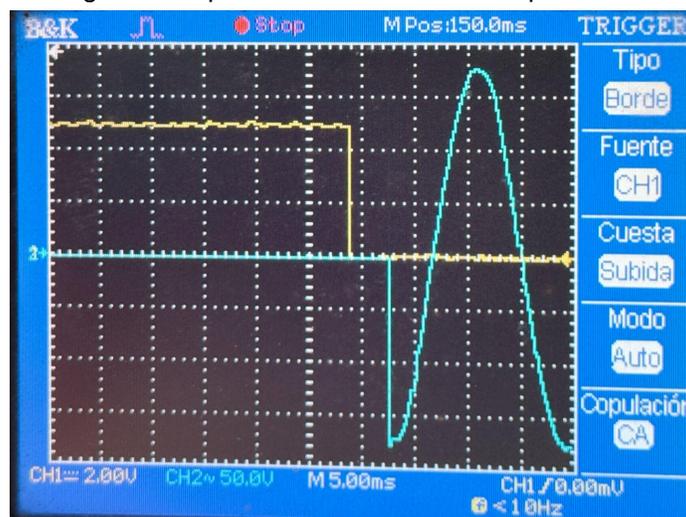


Fig. 75. Respuesta de válvula reserva prueba 3.

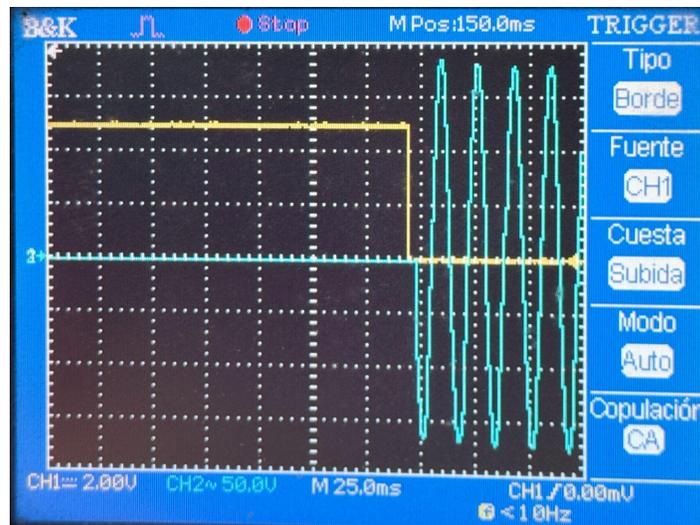


Fig. 76. Respuesta de válvula reserva prueba 4.

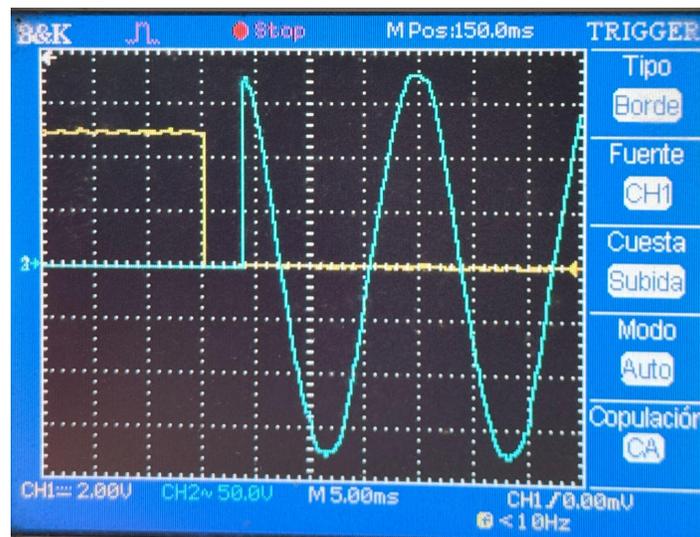


Fig. 77. Respuesta de válvula reserva prueba 5.

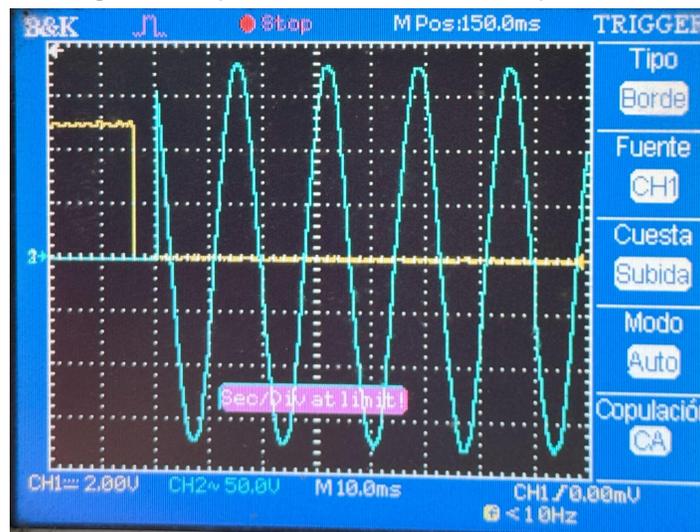


Fig. 78. Respuesta de válvula reserva prueba 6.

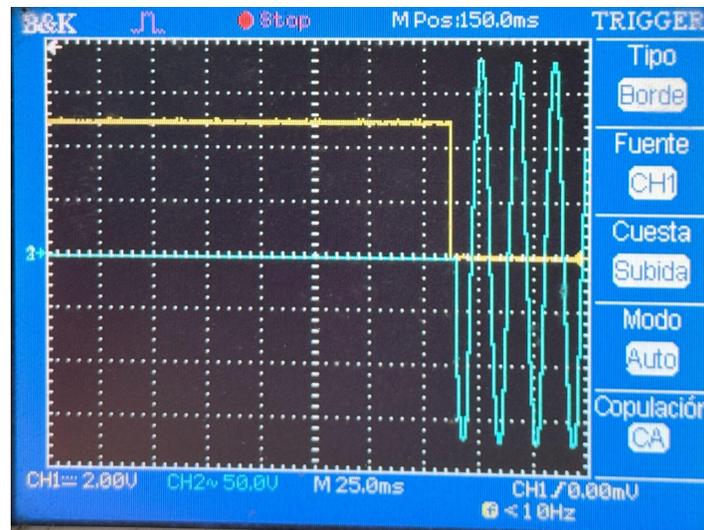


Fig. 79. Respuesta de válvula reserva prueba 7.

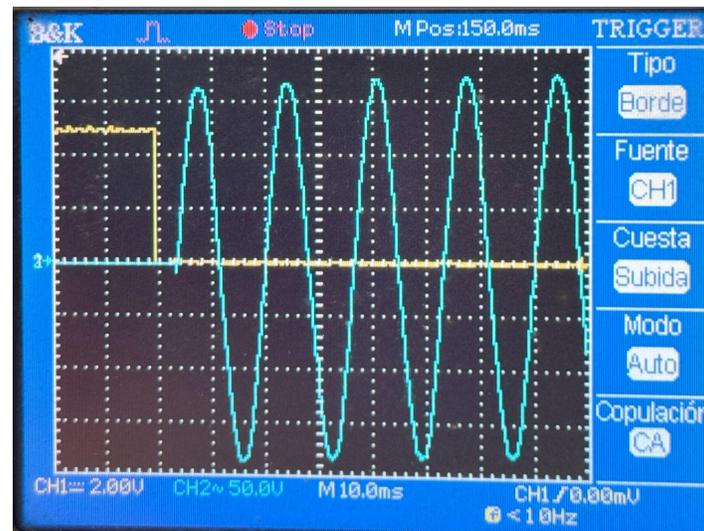


Fig. 80. Respuesta de válvula reserva prueba 8.

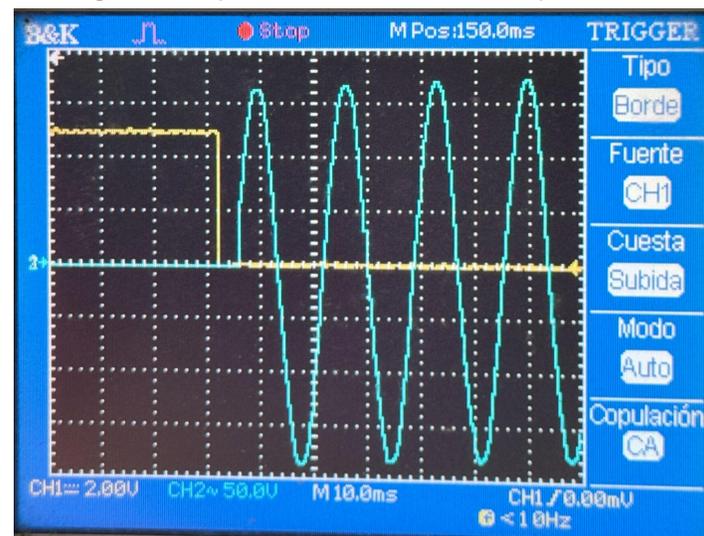


Fig. 81. Respuesta de válvula reserva prueba 9.

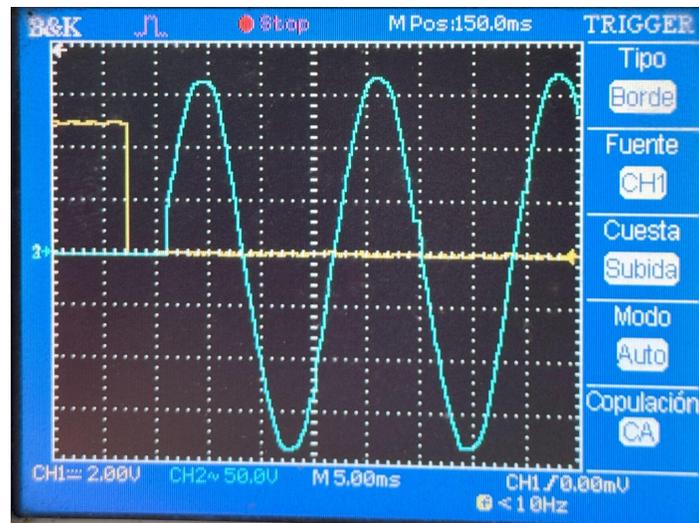


Fig. 82. Respuesta de válvula reserva prueba 10.

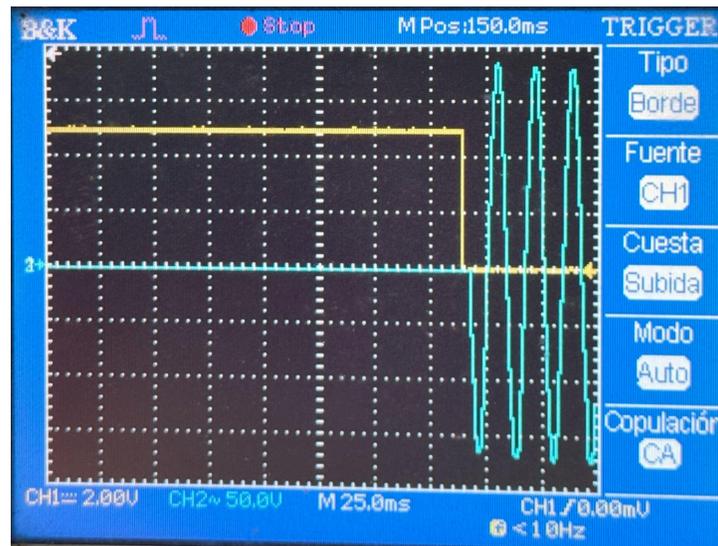


Fig. 83. Respuesta de válvula reserva prueba 11.

### Válvula Vacío

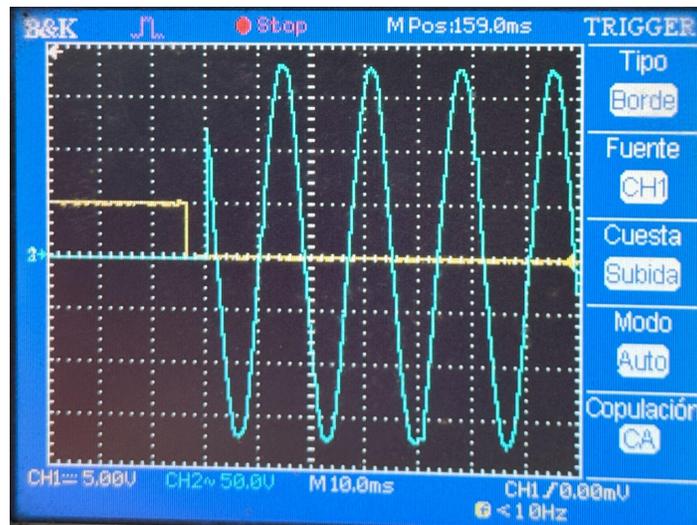


Fig. 84. Respuesta de válvula vacío prueba 1.

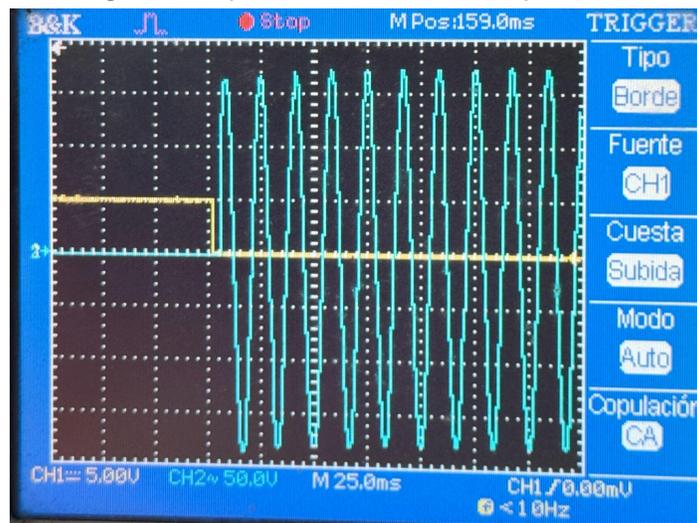


Fig. 85. Respuesta de válvula vacío prueba 2.

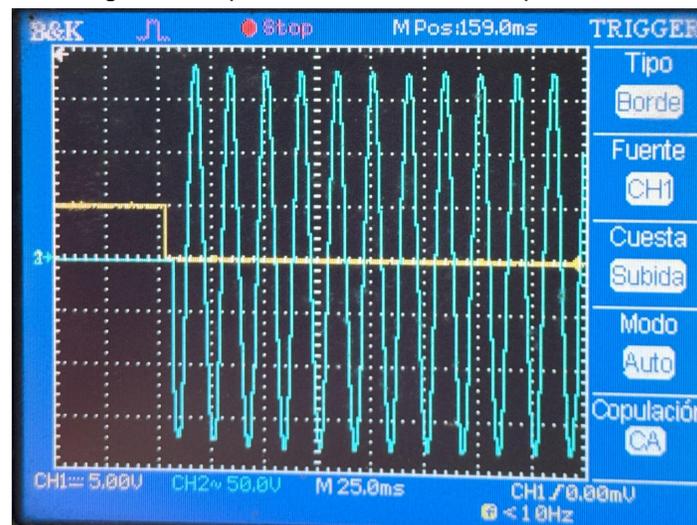


Fig. 86. Respuesta de válvula vacío prueba 3.

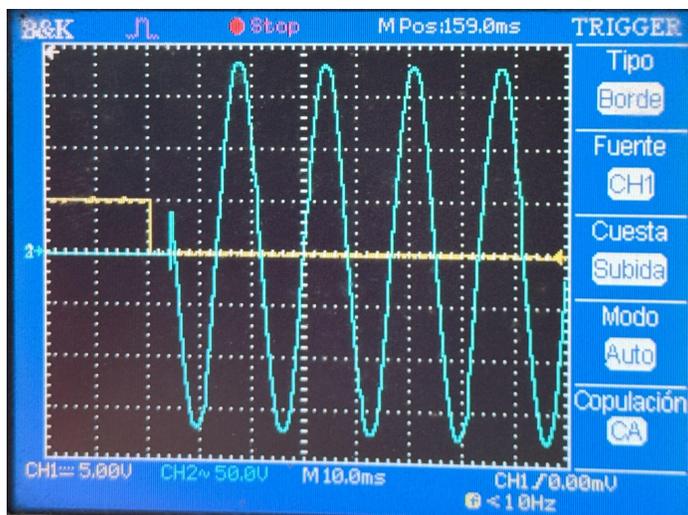


Fig. 87. Respuesta de válvula vacío prueba 4.

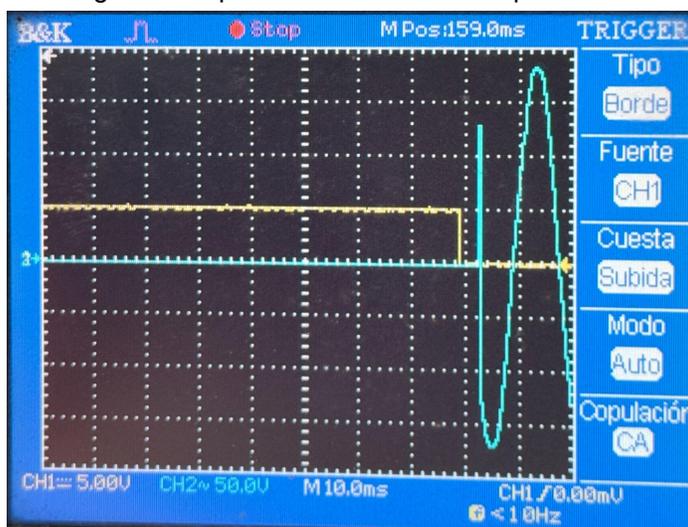


Fig. 88. Respuesta de válvula vacío prueba 5.

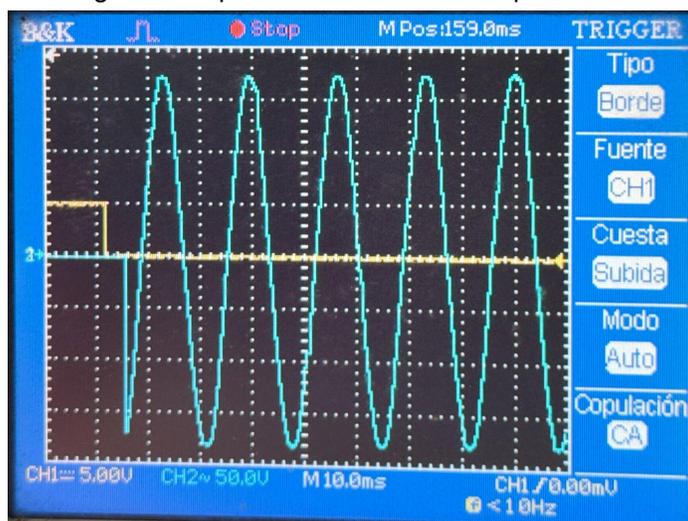


Fig. 89. Respuesta de válvula vacío prueba 6.

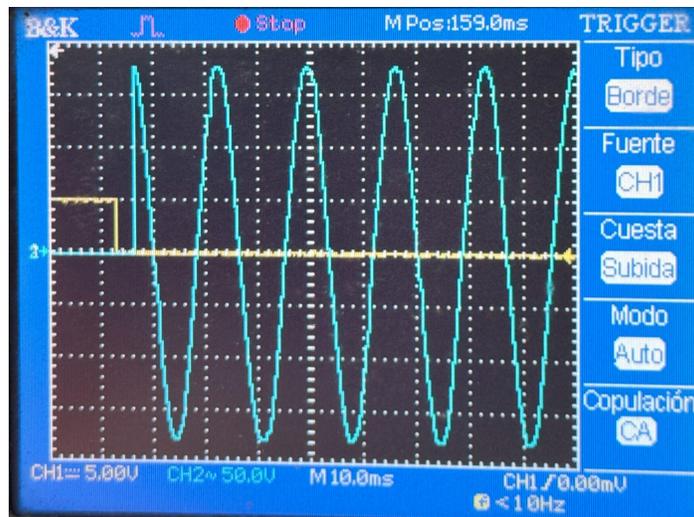


Fig. 90. Respuesta de válvula vacío prueba 7.

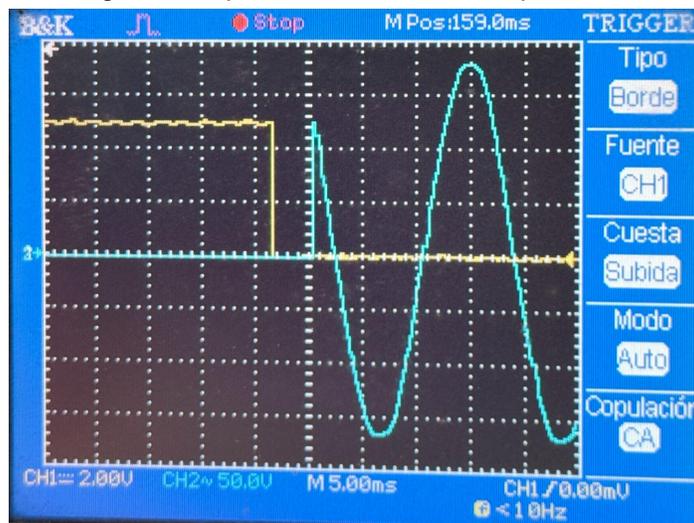


Fig. 91. Respuesta de válvula vacío prueba 8.

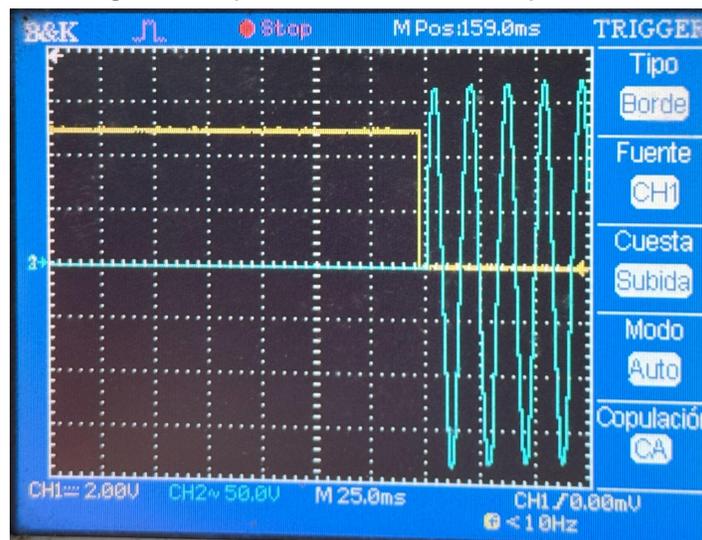


Fig. 92. Respuesta de válvula vacío prueba 9.

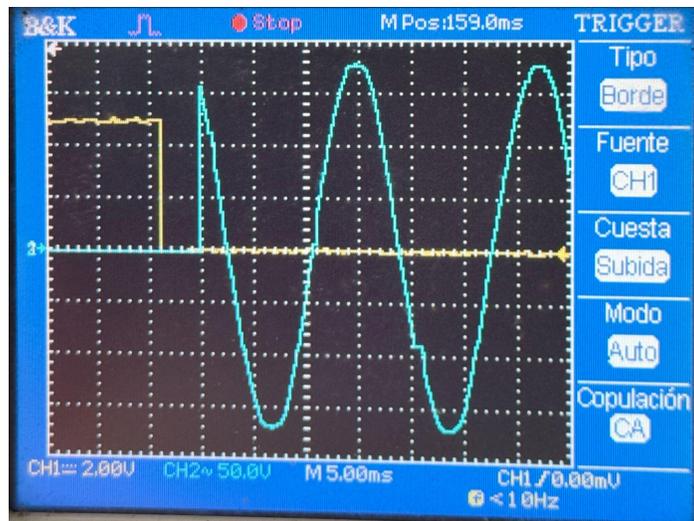


Fig. 93. Respuesta de válvula vacío prueba 10.

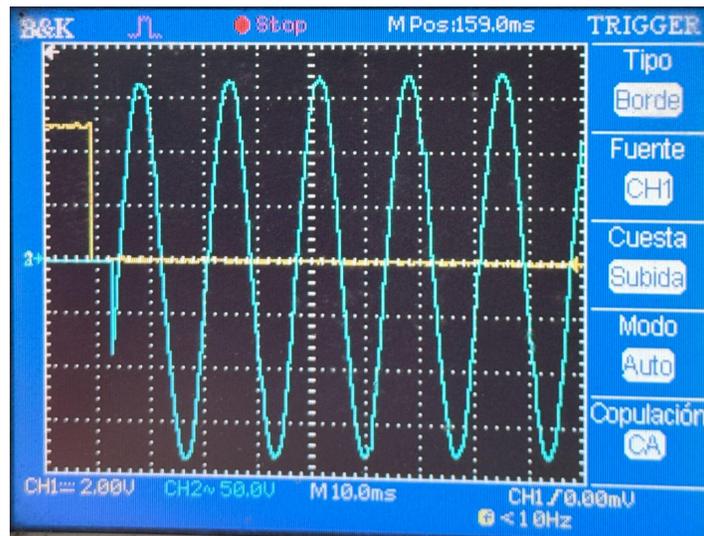


Fig. 94. Respuesta de válvula vacío prueba 11.

**Pruebas Adicionales**

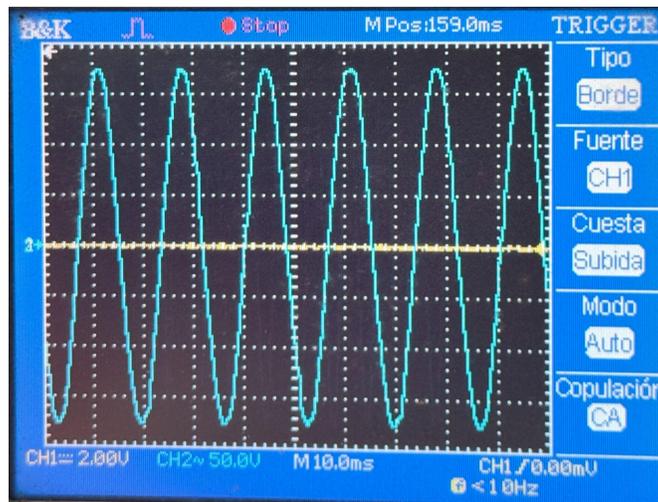


Fig. 95. Respuesta válvula encendida.

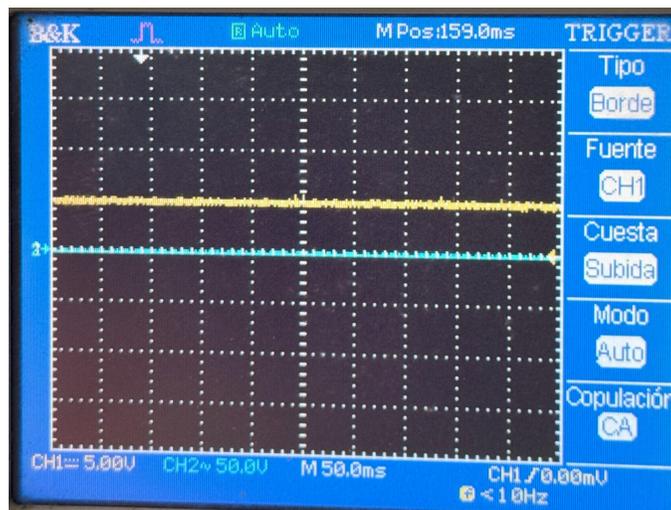


Fig. 96. Respuesta válvula apagada.

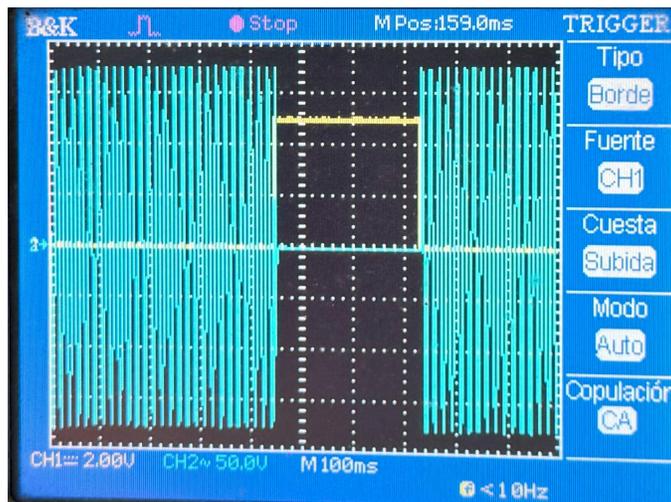


Fig. 97. Encendido, apagado y encendido de válvula.

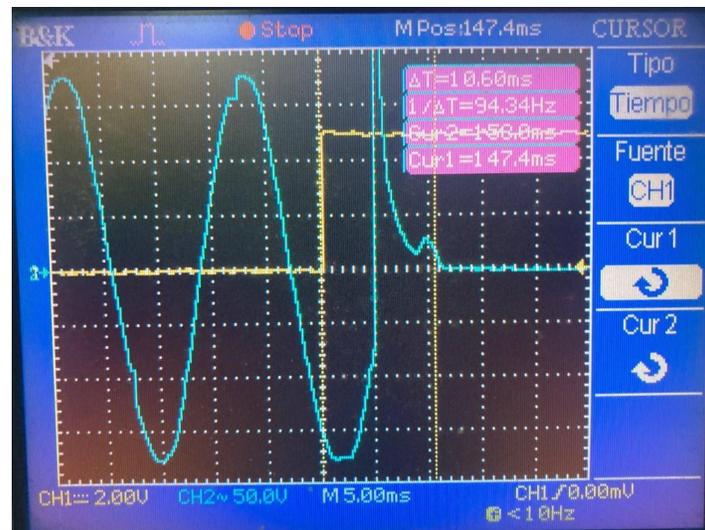


Fig. 98. Tiempo de respuesta con cursores del osciloscopio.

Tabla 2. Tiempos de respuesta de las electroválvulas.

Tiempos de respuesta de las electroválvulas					
Número de prueba	Cámara/Horno (ms)	Medio Ambiente (ms)	Hidrógeno (ms)	Reserva (ms)	Vacío (ms)
1	4.32	4.16	3.94	4.98	3.79
2	4.73	4.22	4.66	4.82	4.02
3	4.56	4.39	4.07	5.65	4.12
4	4.62	4.61	4.54	5.62	3.95
5	4.44	5.02	4.15	3.93	3.88
6	4.39	4.29	7.09	4.04	4.21
7	4.55	4.96	3.89	4.20	4.39
8	4.92	3.99	4.52	3.76	3.53
9	5.65	4.10	5.18	4.69	4.57
10	5.26	5.06	6.14	3.55	4.26
11	5.37	6.06	4.77	3.88	3.99
<b>Tiempo de respuesta promedio por electroválvula (ms)</b>	4.80	4.62	4.81	4.47	4.06
<b>Tiempo de respuesta promedio de las electroválvulas (ms)</b>	4.55				

### Pruebas de tiempo de respuesta de las válvulas neumáticas.

Primeramente, el manifold debe conectarse al sistema de aire comprimido, como se muestra en la Figura 99.



Fig. 99. Conexión manifold para prueba de tiempo de respuesta de válvula neumática.

Seguidamente, se debe conectar el sensor de flujo entre el manifold y la válvula neumática, como se muestra en la Figura 100.



Fig. 100. Conexión sensor de flujo para prueba de tiempo de respuesta de válvula neumática.

Por último, se debe energizar la electroválvula a probar y observar el tiempo de respuesta en el sensor de flujo. En la Tabla 3 se encuentran los tiempos de respuesta de las válvulas neumáticas obtenidas mediante el sensor de flujo.

Tabla 3. Tiempos de respuesta de las válvulas neumáticas.

Tiempos de respuesta de las válvulas neumáticas					
Número de prueba	Cámara/Horno (ms)	Medio Ambiente (ms)	Hidrógeno (ms)	Reserva (ms)	Vacío (ms)
1	326.65	401.95	321.65	412.44	379.99
2	354.21	367.77	365.48	500.65	402.12
3	330.96	395.26	398.41	350.60	412.26
4	312.14	358.96	357.95	360.36	395.96
5	369.20	345.45	347.32	359.13	388.41
6	420.69	322.89	345.61	395.31	421.57
7	399.64	366.11	378.91	366.22	439.75
8	367.28	374.25	309.04	354.20	353.62
9	359.32	326.74	318.06	343.43	457.56
10	375.14	333.59	397.88	365.27	426.61
11	382.33	317.55	336.94	323.32	399.11
<b>Tiempo de respuesta promedio por válvula (ms)</b>	363.41	355.50	352.48	375.54	407.00
<b>Tiempo de respuesta promedio de las válvulas (ms)</b>	370.79				

**Pruebas de validación de respuesta del manifold ante simulación de presión.**

Se ejecutaron los procesos “Pressure Loss Control” y “System Purge” descritos en el manual del usuario. En cada etapa del proceso se verificó el estado de las válvulas físicamente en el manifold.

**Pressure Loss**

Se observan los datos graficados para cada prueba en las siguientes figuras.



Fig. 101. Prueba 1. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 0.0 kPa.

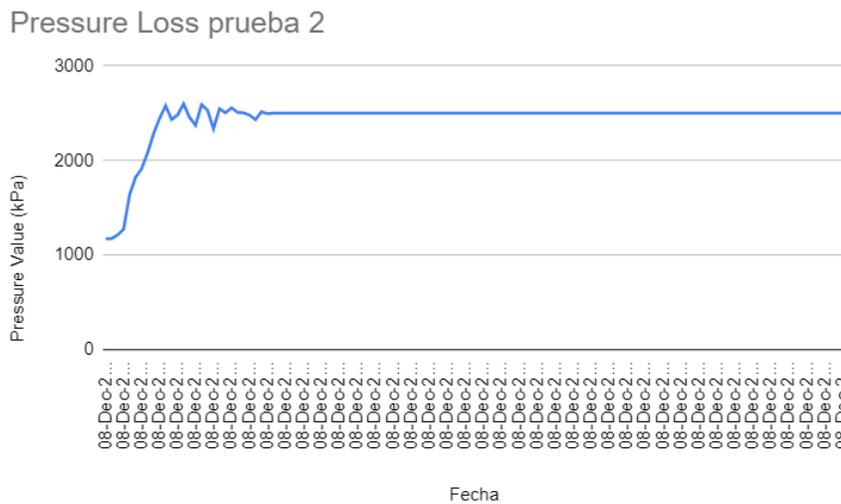


Fig. 102. Prueba 2. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 1175.3 kPa.



Fig. 103. Prueba 3. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 3513.7 kPa.

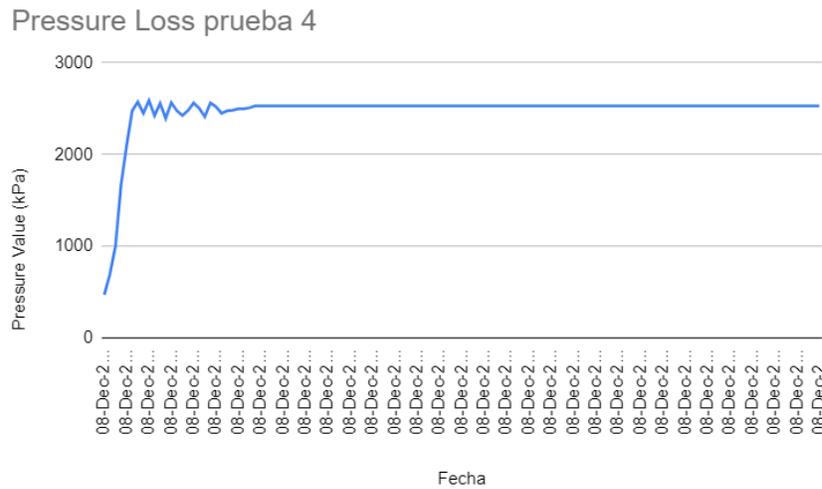


Fig. 104. Prueba 4. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 470.9 kPa.



Fig. 105. Prueba 5. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 2901.1 kPa.

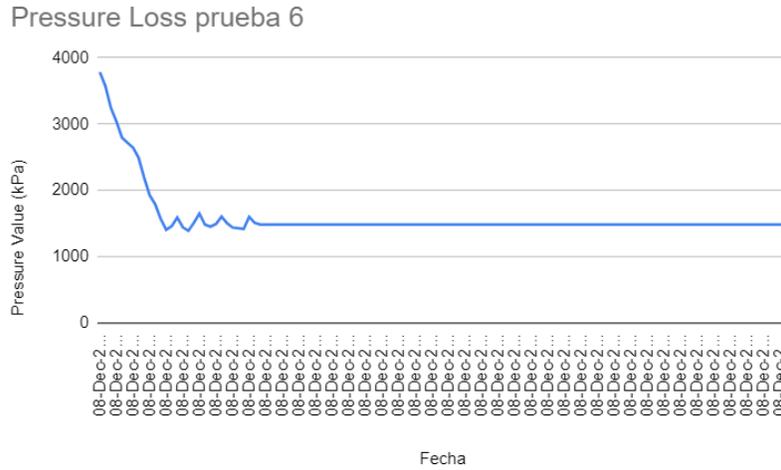


Fig. 106. Prueba 6. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 3913.4 kPa.

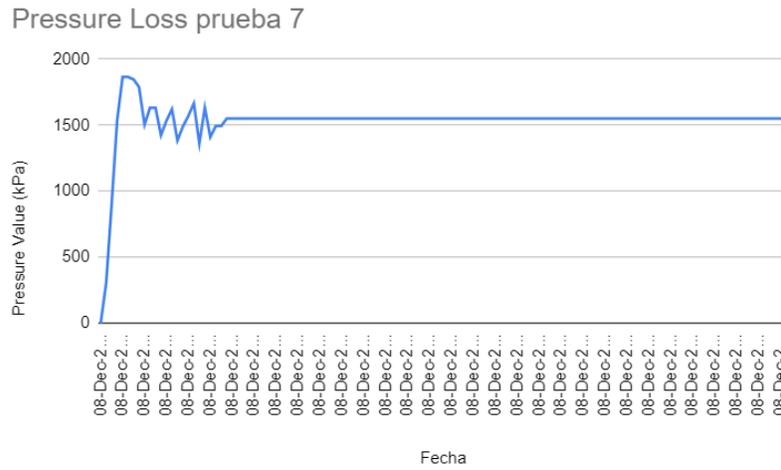


Fig. 107. Prueba 7. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 0.0 kPa.

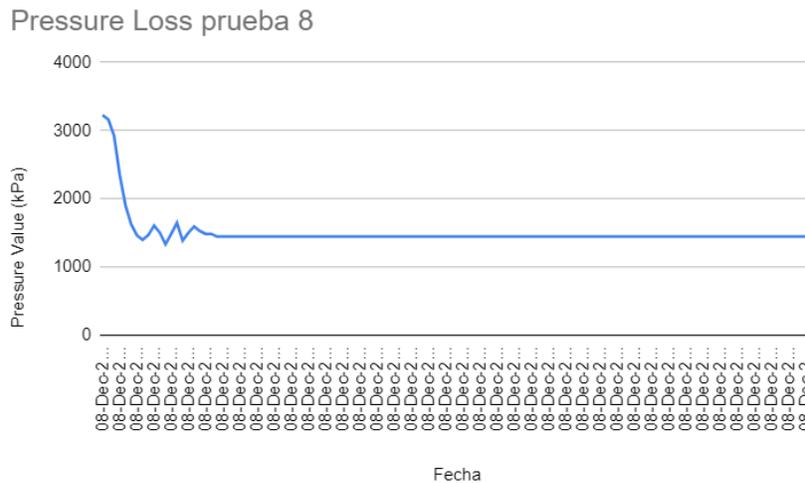


Fig. 108. Prueba 8. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 3226.1 kPa.

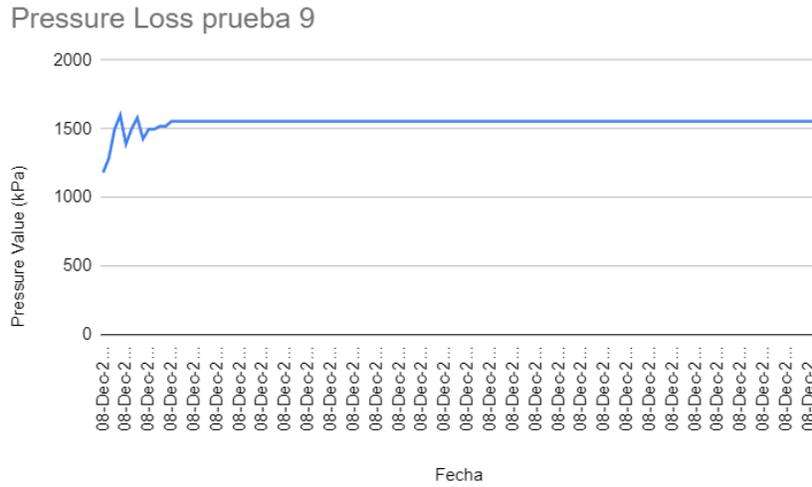


Fig. 109. Prueba 9. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 1181.66 kPa.

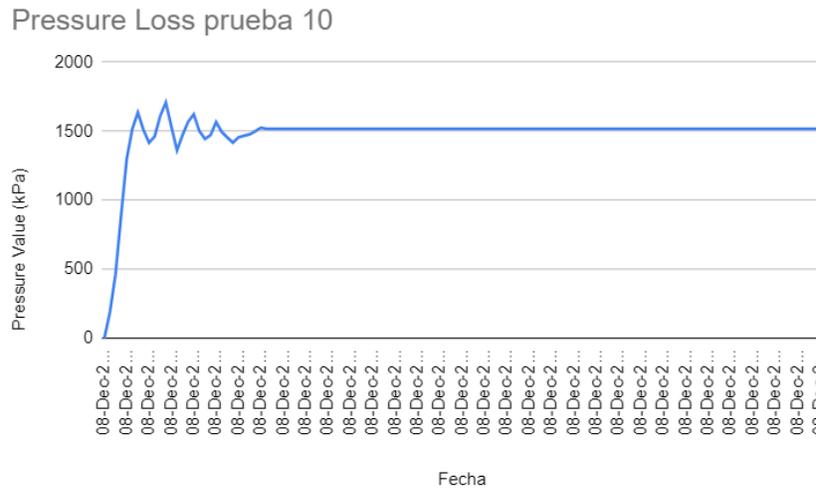


Fig. 110. Prueba 10. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 0.0 kPa.



Fig. 111. Prueba 11. Simulación de pérdidas de presión. Valor inicial: 1397.8 kPa.

En la Tabla 4 se encuentran los estados de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de pérdida de presión simuladas.

Tabla 4. Validación de estado de válvulas en el proceso de pérdidas de presión.

Estado de las válvulas			
# de prueba		Environment	Hydrogen
1	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
2	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
3	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
4	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
5	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
6	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
7	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
8	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
9	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
10	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0
11	Límite superior excedido	1	0
	Límite inferior no alcanzado	0	1
	Entre límites	0	0

### System Purge

Se observan los datos graficados para cada prueba en las siguientes figuras.

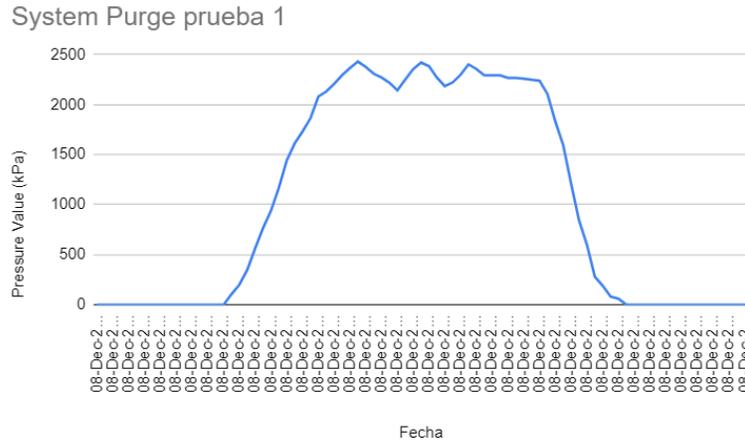


Fig. 112. Prueba 1. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 0.0 kPa.



Fig. 113. Prueba 2. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 750.6 kPa.

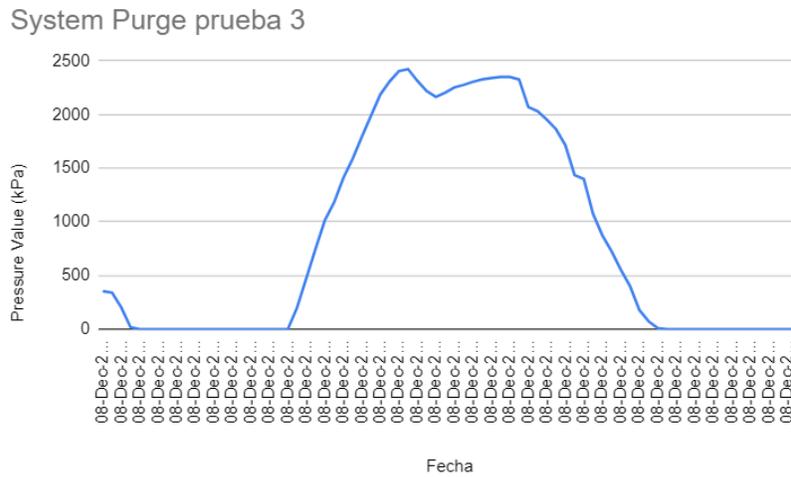


Fig. 114. Prueba 3. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 353.6 kPa.

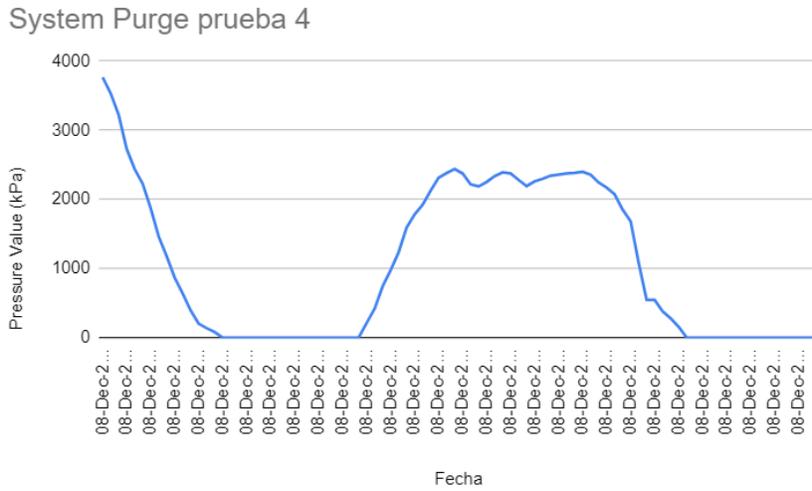


Fig. 115. Prueba 4. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 3764.4 kPa.

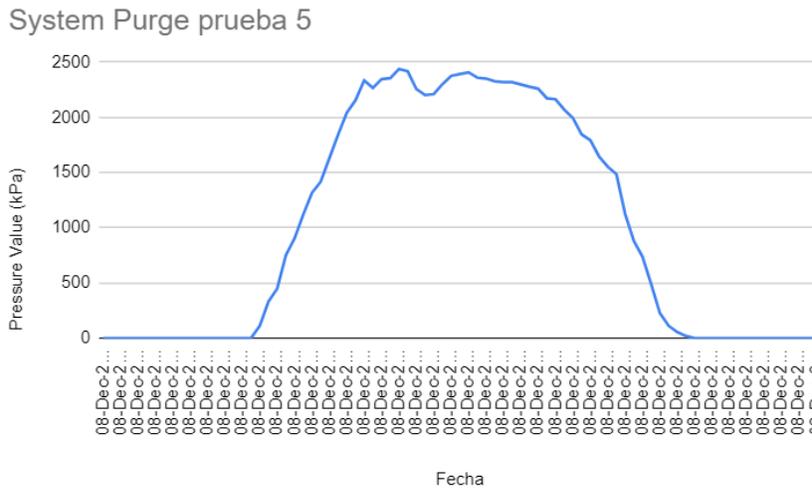


Fig. 116. Prueba 5. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 0.0 kPa.

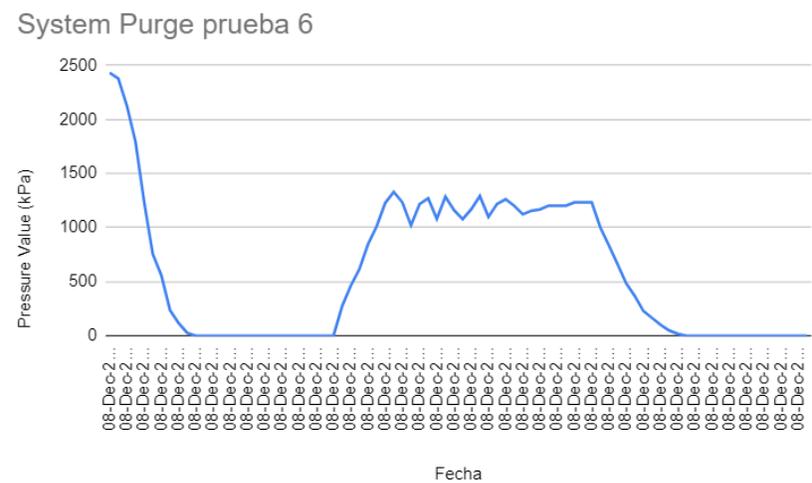


Fig. 117. Prueba 6. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 2429.6 kPa.

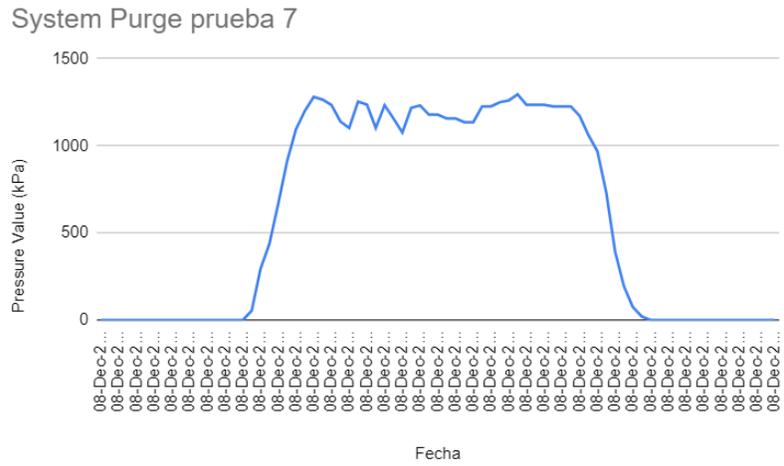


Fig. 118. Prueba 7. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 0.0 kPa.

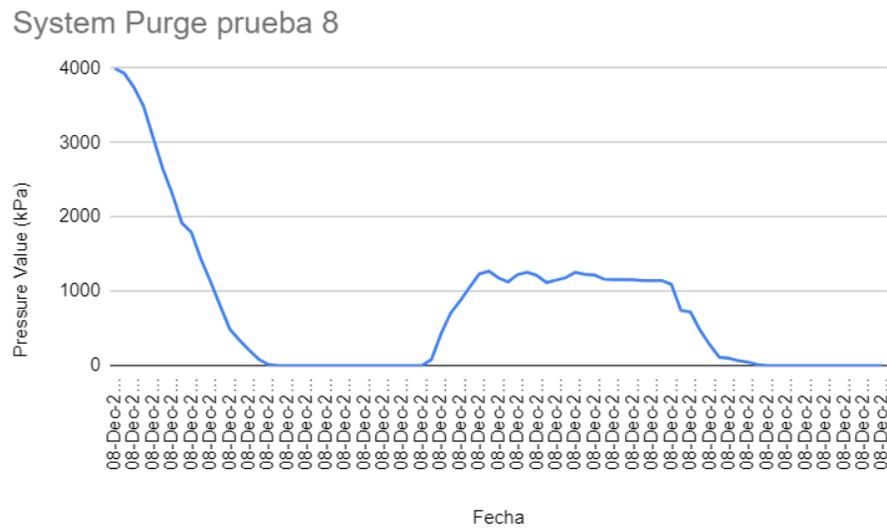


Fig. 119. Prueba 8. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 4000.0 kPa.

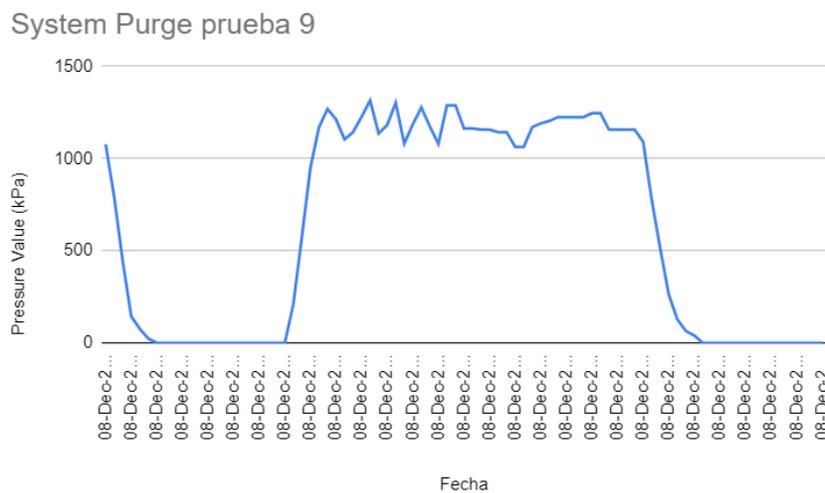


Fig. 120. Prueba 9. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 1077.6 kPa.

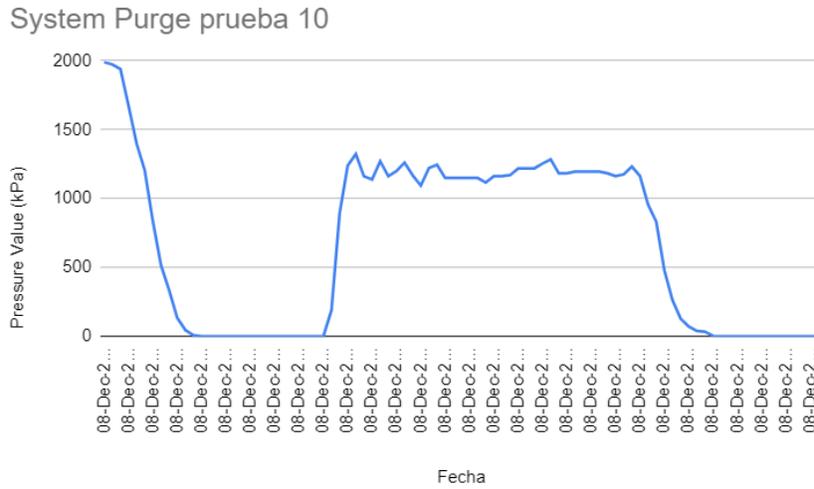


Fig. 121. Prueba 10. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 1990.2 kPa.

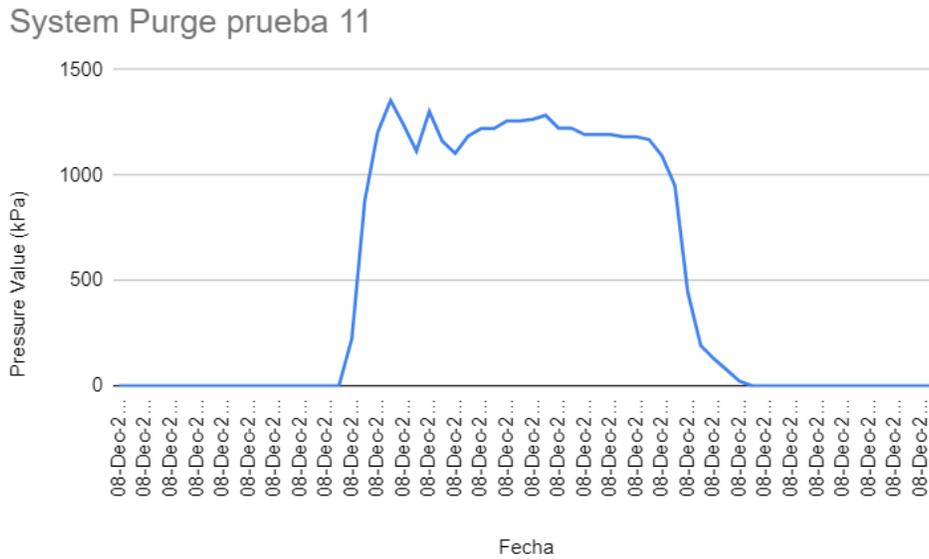


Fig. 122. Prueba 11. Simulación de purga del sistema. Valor inicial: 0.0 kPa.

En la Tabla 5 se observan los estados de las válvulas durante la ejecución de las pruebas de purga del sistema simuladas.

Tabla 5. Validación de estado de válvulas en el proceso de purga del sistema.

# de prueba	Estado de las válvulas			
		Environment	Hydrogen	Vacuum
1	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
2	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
3	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
4	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
5	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
6	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
7	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
8	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
9	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
10	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1
11	Ciclo Vacío 1	0	0	1
	Presión	0/1	0/1	0
	Ciclo Vacío 2	0	0	1

# Apéndice I

## Encuesta Facilidad de Uso de Interfaz

Sección 1 de 6

## Encuesta Facilidad de Uso de Interfaz

**B I U**

Esta encuesta tiene como objetivo medir la facilidad de uso de la interfaz creada para la automatización del equipo PCT.

**Instrucciones:** Para cada pregunta, seleccione un número en la escala del 1 al 5, donde:

- 1: Muy difícil
- 2: Difícil
- 3: Neutral
- 4: Fácil
- 5: Muy fácil

Correo electrónico \*

Correo electrónico válido

Este formulario recopila correos electrónicos. [Cambiar la configuración](#)

Figura I.1: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Inicio.

Sección 2 de 6

### Accesibilidad General

Descripción (opcional)

¿Qué tan fácil fue acceder a las funciones principales de la interfaz? \*

1	2	3	4	5
☆	☆	☆	☆	☆

¿Qué tan intuitiva considera la distribución de los botones y controles en la interfaz? \*

1	2	3	4	5
☆	☆	☆	☆	☆

¿Qué tan claro fue el diseño visual de la interfaz para entender el estado del sistema? \*

1	2	3	4	5
☆	☆	☆	☆	☆

Figura I.2: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Accesibilidad General.

Sección 3 de 6

Configuración y Operación

Descripción (opcional)

¿Qué tan fácil fue configurar los valores iniciales, como presión o temperatura, en los cuadros de texto? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Qué tan fácil fue iniciar y detener un proceso desde la interfaz? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Qué tan sencillo fue realizar cambios en un proceso en ejecución? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Qué tan fácil fue validar el funcionamiento de las válvulas en la sección de prueba (Testing; Valves Control)? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Figura I.3: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Configuración y Operación.

Sección 4 de 6

Visualización y Datos

Descripción (opcional)

¿Qué tan clara fue la visualización de gráficos y datos en tiempo real? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Qué tan sencillo fue interpretar los mensajes o notificaciones mostrados en la interfaz? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Qué tan fácil fue descargar los datos recopilados al finalizar un proceso? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Figura I.4: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Visualización y Datos.

Sección 5 de 6

Experiencia General ✕ ⋮

Descripción (opcional)

¿Qué tan cómodo/a se sintió al utilizar la interfaz para controlar el sistema? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

¿Considera que el tiempo necesario para aprender a usar la interfaz fue razonable? \*

1 2 3 4 5

☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Figura I.5: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Experiencia General.

Sección 6 de 6

Retroalimentación ✕ ⋮

Descripción (opcional)

Comentarios adicionales

Texto de respuesta largo

Figura I.6: Encuesta de facilidad de uso de interfaz: Retroalimentación.