

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE IRAPUATO



**INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE IRAPUATO**

ESTUDIOS CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL
NÚMERO 11-00065

**AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DE
VOLUMEN DE FLUJO PARA LA CALIBRACIÓN
DE INSTRUMENTOS DE PRESIÓN, UTILIZANDO
COMO PATRÓN LA BALANZA DE PRESIÓN
NEUMÁTICA DE ALTA EXACTITUD**

OPCIÓN I: TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:
ING. SAMUEL ORTEGA CANO**

**DIRECTORES DE TESIS:
M.C. JOSÉ JUAN ALFARO RODRÍGUEZ
DR. JOSÉ MIGUEL SOSA ZUÑIGA**

IRAPUATO, GTO.

FEBRERO 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública



Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
Dirección General
Dirección de Académica

Irapuato, Guanajuato, **25/febrero/2026**
Oficio No. CIPI-003-2026

ASUNTO: Autorización de impresión de tesis de maestría

DR. MARIO ALBERTO JUÁREZ BALDERAS
PRESIDENTE DEL CONSEJO DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por medio de la presente y a solicitud del comité tutorial integrado por:

M.C. José Juan Alfaro Rodríguez
Dr. José Miguel Sosa Zúñiga
Dr. Adolfo Rafael López Núñez
Dr. Gilberto Muñoz Moreno

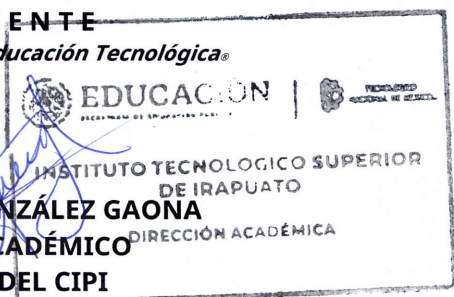
se autoriza la impresión de la tesis titulada **“Automatización del Control de Volumen de Flujo para la Calibración de instrumentos de presión, utilizando como patrón la balanza de presión neumática de alta exactitud”** realizada por el estudiante **C. Samuel Ortega Cano** con número de control **MIP23110016** la cual ha sido desarrollada dentro del programa de la Maestría en Ingeniería Electrónica bajo la dirección del M.C. José Juan Alfaro Rodríguez y la codirección del Dr. José Miguel Sosa Zúñiga y ha sido revisada y aprobada por el comité tutorial antes mencionado.

Sin otro en particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

M.C. ISAI GONZÁLEZ GAONA
DIRECTOR ACADÉMICO
PRESIDENTE DEL CIPI



ccp.

M.I. Ernesto Cabal Yépez
M.C. Akira Torreblanca Ponce

Titular de Jefatura de División de Ing. Electrónica
Titular del Departamento de Investigación

Para su conocimiento y atención
Para su seguimiento



2026
año de
Margarita Maza





INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE IRAPUATO

Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **Automatización del control de volumen de flujo para la calibración de instrumentos de presión, utilizando como patrón la balanza de presión neumática de alta exactitud** presentada para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería Electrónica fue elaborada por el Ing. **Samuel Ortega Cano** y aprobada el **27 de Febrero de 2026** por los suscritos, designados por el consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Irapuato.

M.C. José Juan Alfaro Rodríguez

(Director de la tesis)

Dr. José Miguel Sosa Zuñiga

(Co-Director de la tesis)

Dr. Adolfo Rafel López Núñez

(Sinodal)

Dr. Gilberto Muñoz Moreno

(Sinodal)

Créditos institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Eléctrica y Electrónica de Potencia (LEEP) del **Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato**, bajo la dirección del M.C. José Juan Alfaro Rodríguez, en colaboración con el Dr. José Miguel Sosa Zuñiga, adscritos a este instituto.

Agradecimientos

Agradezco al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (TecNM/ITESI) por brindarme las herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo. Asimismo, doy mi reconocimiento al Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Electrónica por haberme permitido realizar esta investigación en conjunto con el laboratorio de Metrología ubicado en la ciudad de Irapuato, Gto.

Gracias a mis directores de tesis, el M.C. José Juan Alfaro Rodríguez y el Dr. José Miguel Sosa Zuñiga, por brindarme conocimiento, orientaciones, dedicación, persistencia, paciencia y motivación, pues han sido fundamentales para mi formación. De igual manera, agradezco a los sinodales, el Dr. Adolfo Rafael López Núñez y el Dr. Gilberto Muñoz Moreno, cuyas aportaciones mejoraron significativamente esta tesis.

A mi esposa, familia y maestros por su apoyo, educación, confianza, y sus consejos en todo momento, así como por acompañarme en este largo camino lleno de estudio, desvelos, aprendizajes, experiencias, etc., que se ha convertido en un logro más.

También me permito agradecer al Ing. Federico Alberto Rodríguez Estrada y M.I. Lindsay Yasmin Quiroz Andrade que estuvieron brindándome su apoyo durante mi investigación en el laboratorio de Metrología ubicado en la ciudad de Irapuato, Gto.

Resumen

En el presente trabajo se muestra el desarrollo e implementación de un sistema de control automático para la generación y regulación de presión en el proceso de calibración de instrumentos manométricos, utilizando como patrón una balanza de presión neumática de alta exactitud. El objetivo es garantizar la estabilidad del punto de equilibrio del conjunto pistón–cilindro con un control en lazo cerrado que reduzca el error en estado estacionario.

El modelo dinámico del proceso de calibración se representa en el espacio de estados a partir de las propiedades físicas que rigen la generación de presión. A partir de este modelo, se obtiene la función de transferencia y se diseñan estrategias de control de tipo PD, PI y PID, evaluando su desempeño mediante simulación en términos de estabilidad, tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error en régimen permanente.

La implementación física del sistema de control se elabora sobre una plataforma Raspberry Pi 4, configurada con un sistema operativo Linux y soporte para comunicación GPIB y serial, donde se ejecuta el algoritmo de control en tiempo discreto y se establece la comunicación con los instrumentos. El sistema permite la supervisión en tiempo real de la variable controlada y el almacenamiento de los datos generados durante cada prueba de calibración, asegurando la trazabilidad del proceso.

El sistema propuesto integra el modelo matemático, el análisis de estabilidad y un control digital en una arquitectura orientada a la automatización de laboratorios de calibración, proporcionando una solución que mejora la precisión, la repetibilidad y la confiabilidad del proceso de regulación de presión en la calibración manométrica.

Abstract

This work presents the development and implementation of an automatic control system for pressure generation and regulation in the calibration process of manometric instruments, using a pressure balance as the reference standard. The main objective is to ensure the stability of the piston–cylinder equilibrium position through a closed-loop control strategy that minimizes steady-state error.

The dynamic model of the system is formulated in state-space representation based on the physical principles governing pressure generation, incorporating air buoyancy effects, environmental variations, and geometric parameters. From this model, the transfer function is derived and PD, PI, and PID control strategies are designed and evaluated through simulation. System performance is analyzed in terms of stability, settling time, overshoot, and steady-state error.

The physical implementation is carried out on a Raspberry Pi 4 platform running a Linux operating system with GPIB and serial communication support. The discrete-time control algorithm is executed in real time, enabling communication with measurement instruments, real-time monitoring of the controlled variable, and automated data acquisition. The system ensures traceability by storing calibration data generated during each test.

The proposed solution integrates mathematical modeling, stability analysis, and digital control within an automation-oriented architecture for calibration laboratories. The results demonstrate improvements in accuracy, repeatability, and reliability in the pressure regulation process for manometric calibration applications.

Índice general

1. Generalidades del proyecto	1
1.1. Introducción	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Justificación	5
2. Estado del arte	6
2.1. Regulación de presión en calibración	7
2.2. Balanza de presión como patrón de referencia	8
2.3. Sistemas de control para regulación de presión	9
2.3.1. Sistemas de control mecánicos	10
2.3.2. Sistemas electrónicos y automatización	10
2.3.3. Modelado y simulación de sistemas de presión	10
3. Marco teórico	11
3.1. Calibración de equipos de presión	12
3.2. Equipos utilizados en la calibración	14
3.2.1. Balanza de presión	15
3.2.2. Funcionamiento de la balanza de presión	17
3.2.3. Características técnicas y avances del modelo	19
3.2.4. Controlador de presión	20
3.2.5. Barómetro	22
3.2.6. Termohigrómetro	23
3.2.7. Raspberry Pi 4	24
3.3. Sistemas de comunicación	25
3.3.1. Protocolos de comunicación	25
3.3.2. Universal Serial Bus (USB)	27
3.3.3. Conversión USB a serial y GPIB	28
3.3.4. Interacción entre Raspberry PI e instrumentos	29
3.4. Parámetros físicos del sistema de balanza de presión	31
3.4.1. Fórmula de la presión	31
3.4.2. Correcciones de la presión	32
3.5. Sistemas de control	37
3.5.1. Controlador PI	38
3.5.2. Controlador PD	39

3.5.3. Controlador PID	39
4. Diseño y simulación del modelo matemático	41
4.1. Modelo matemático	43
4.1.1. Variables de error	44
4.1.2. Función de transferencia	45
4.2. Implementación de controlador	46
4.2.1. Controlador PD	46
4.2.2. Controlador PI	49
4.2.3. Controlador PID	51
4.2.4. Comparación y selección del controlador	53
5. Implementación del sistema de calibración	56
5.1. Controlador central	57
5.2. Diseño e implementación de la base de datos	58
5.3. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario	60
5.3.1. Arquitectura de la interfaz	61
5.3.2. Organización de pantallas	62
5.3.3. Componentes de la interfaz	63
5.3.4. Integración con la base de datos	64
5.3.5. Visualización del punto de equilibrio	64
5.3.6. Integración con el sistema de control	65
5.4. Comunicación del sistema	66
5.4.1. Instrumentos y enlaces de comunicación	66
5.4.2. Flujo de adquisición de datos y envío de comandos	67
5.4.3. Manejo de errores y confiabilidad del sistema	68
5.5. Integración física del sistema	69
5.5.1. Plataforma central y dispositivos de comunicación	69
5.5.2. Integración del sistema de presión	69
5.6. Integración del modelo matemático con la implementación experimental . .	70
5.6.1. Implementación digital del controlador	70
5.6.2. Lazo cerrado digital	72
6. Resultados	73
6.1. Resultados de simulación	74
6.1.1. Señales de entrada utilizadas en la simulación	75
6.1.2. Respuesta del sistema en lazo cerrado	78
6.2. Resultados experimentales con control manual	80
6.2.1. Condiciones de la prueba	80
6.2.2. Respuesta del sistema sin control automático	80
6.3. Resultados experimentales con controlador PID	82
6.3.1. Condiciones de la prueba	82
6.4. Comparación de desempeño	83

7. Conclusiones y trabajos futuros **85**

ANEXOS **90**

Anexo A 90

Anexo B 91

Lista de Acrónimos

CENAM	Centro Nacional de Metrología
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación A.C.
GPIB	Bus de Interfaz de Propósito General
GPIO	Entrada-Salida de Propósito General
HR	Humedad Relativa
IBC	Instrumento Bajo Calibración
OS	Sistema Operativo
PD	Proporcional-Derivativo
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PoE	Alimentación por Ethernet
SCADA	Control de Supervisión y Adquisición de Datos
USB	Bus Universal en Serie

Índice de figuras

1.1.	Diagrama del sistema de control propuesto.	4
2.1.	(a). Balanza de presión manométrica de patrón primario con sus masas y campana de vidrio. (b). Principio de calibración de presión mediante el método de peso muerto [1].	9
3.1.	Diagrama de flujo del proceso de calibración.	13
3.2.	Diagrama de conexiones del sistema de calibración.	15
3.3.	Componentes básicos de una balanza de presión típica en el proceso de calibración.	15
3.4.	Diagrama de fuerzas en el ensamble cilindro-pistón.	17
3.5.	Controladora de presión sugerida.	21
3.6.	Medidor de presión atmosférica sugerido.	22
3.7.	Termohigrómetro utilizado en el sistema de calibración.	23
3.8.	Modalidades de transmisión de datos.	26
3.9.	Puerto DB-9.	26
3.10.	Disposición y funciones de cada uno de los pines de un puerto GPIB.	27
3.11.	Tipos de puertos USB [2].	28
3.12.	Convertidores de USB a diferentes protocolos.	28
3.13.	Configuración inicial de la Raspberry.	30
3.14.	a) Sistema de control en lazo abierto. b) Sistema de control en lazo cerrado.	38
4.1.	Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PD.	47
4.2.	Diagrama de Polos y Ceros del Controlador PD.	49
4.3.	Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PI.	49
4.4.	Diagrama de Polos y Ceros del Controlador PI.	51
4.5.	Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PID.	52
4.6.	Diagrama de polos y ceros del Controlador PID.	53
4.7.	Respuestas del sistema al escalón unitario utilizando los controladores PI, PD y PID.	54
5.1.	Diagrama Entidad-Relación de la base de datos utilizada en el sistema.	60
5.2.	Diagrama de bloques del sistema de calibración propuesto.	61
5.3.	Pantalla de inicio de la interfaz gráfica del sistema de calibración.	62
5.4.	Pantalla de configuración previa al proceso de calibración.	64
5.5.	Pantalla de la adquisición de datos y gráfica del punto de equilibrio vs tiempo.	65
5.6.	Pantalla de comunicación implementada en la interfaz gráfica propuesta.	68

5.7. Integración física del sistema propuesto.	70
6.1. Diagrama de bloques del sistema con lazo cerrado con controlador PID con las señales dinámicas cambiantes.	74
6.2. Señales de presión utilizadas como entradas en la simulación.	76
6.3. Señales térmicas empleadas en la simulación.	77
6.4. Señales ambientales utilizadas como entradas en la simulación.	77
6.5. Variables dependientes utilizadas en la simulación.	78
6.6. Señal de presión de desfase entre la referencia y la salida.	79
6.7. Respuesta de la posición del pistón $x_1(t)$ (punto de equilibrio) en lazo cerrado con controlador PID.	79
6.8. Presión aplicada al actuador durante operación manual.	81
6.9. Posición del pistón durante calibración manual.	81
6.10. Señal de corrección de presión generada por el controlador.	82
6.11. Posición del pistón en lazo cerrado con controlador PID.	83

Índice de tablas

3.1. Propiedades físicas de los ensambles cilindro-pistón utilizados en la balanza de pesos muertos [3].	16
3.2. Resumen de las propiedades físicas del juego de masas utilizado en la balanza de pesos muertos.	17
3.3. Propiedades de la balanza de presión del modelo utilizada.	20
3.4. Propiedades del controlador de presión del modelo utilizado [4].	21
3.5. Software básico utilizado en la Raspberry Pi 4B.	29
4.1. Parámetros del controlador PD y de la planta.	48
4.2. Comparación de métricas de desempeño.	55
5.1. Instrumentos del sistema, enlaces de comunicación y función dentro del proceso de calibración.	67
6.1. Valores representativos de las señales de entrada utilizadas en la simulación.	76
6.2. Comparación de desempeño entre simulación, operación manual y control PID.	84

Capítulo 1

Generalidades del proyecto

1.1. Introducción

La alta demanda de control en los procesos industriales y farmacéuticos requieren de una automatización sin intervención humana, para esta automatización se requiere tener instrumentos patrón confiables, estables y trazables metrológicamente [5]. Este proyecto de tesis busca reducir los tiempos y errores humanos al realizar la calibración de instrumentos de presión utilizando como patrón una balanza de pesos muertos de alta exactitud.

La calibración constante de los equipos permite caracterizarlos; esto es, tener un conocimiento y comportamiento del mismo. Con la automatización de estos procesos se permitirá tener más control sobre ellos al reducir los tiempos de calibración y la captura de los datos. Para medir la variable de presión, existen una variedad de equipos, destacando manómetros relativos, absolutos, transductores de presión y balanzas de presión, entre otros.

Las balanzas de presión se utilizan en los laboratorios de calibración como equipos de alta exactitud, ya que la forma en que generan la presión se basa en principios de física básica, con una incertidumbre mucho menor que cualquier equipo comercial.

El término de calibración se refiere a la comparación de un equipo contra un patrón con valores conocidos y trazables al Centro Nacional de Metrología (CENAM). En esta área de estudio, para realizar la calibración, esta se desarrolla en varias etapas: la de pre-carga o ambientación de los patrones, la adquisición de las mediciones, el procesamiento de los datos y la generación de informe técnico [6].

Para adquirir el valor de presión en la terminal de la balanza, se necesita un valor cercano a cero, esto sucede cuando existe una igualdad entre la presión ejercida por el generador de presión y la producida por las pesas patrón colocadas en el pistón. Dicho control se realiza utilizando un controlador de volumen manual. Este proyecto reemplaza la forma manual de control para realizarlo de manera automática. Aunque la primera opción tiene la peculiaridad de la simplicidad de las conexiones de presión, tiene la desventaja de la lentitud del proceso y el incremento del costo de prueba.

Por otro lado, la manera automática considerada la mejor opción, puede ser implementada de varias maneras; una de ellas es la implementación de un sistema de adquisición de

datos, con sensores y actuadores incorporados en los instrumentos, enfocados en reducir los tiempos de calibración y asegurar la estabilidad del sistema.

En este proyecto de tesis se plantea el diseño e implementación de un sistema de control del volumen de flujo neumático para la calibración de equipos de presión, utilizando como patrón la balanza de pesos muertos. De igual manera, se plantea la implementación de una interfaz gráfica para el manejo del control, la elaboración de reportes y la adquisición de los parámetros presentes del sistema como: la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la presión generada y el punto de equilibrio, para que el usuario tenga al finalizar un sistema completo y amigable.

1.2. Planteamiento del problema

El laboratorio de metrología, ubicado en la ciudad de Irapuato, Gto. cuenta con más de 50 procesos acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. (EMA). Dentro de ellos se lleva a cabo la calibración de medidores de magnitud de presión, utilizando patrones de alta exactitud como las balanzas de presión.

La calibración de los equipos medidores de presión consiste en aplicar presiones conocidas durante todo el intervalo del equipo o amplitud del intervalo, utilizando un patrón con trazabilidad al Centro Nacional de Metrología. Se toman las lecturas y con esta información se determina la repetibilidad, la histéresis, el valor cero y el error relativo. El proceso de calibración se realiza de forma manual comprometiendo los valores, aumentando la incertidumbre por el error humano e incrementando el tiempo para dicho proceso.

En esta propuesta de tesis se presenta un sistema de control en la generación de presión, que se comunica y adquiere los valores de los instrumentos de medición, procesa la información, la almacena y por medio de una interfaz gráfica muestra la información y genera el informe de calibración como se muestra en la Figura 1.1.

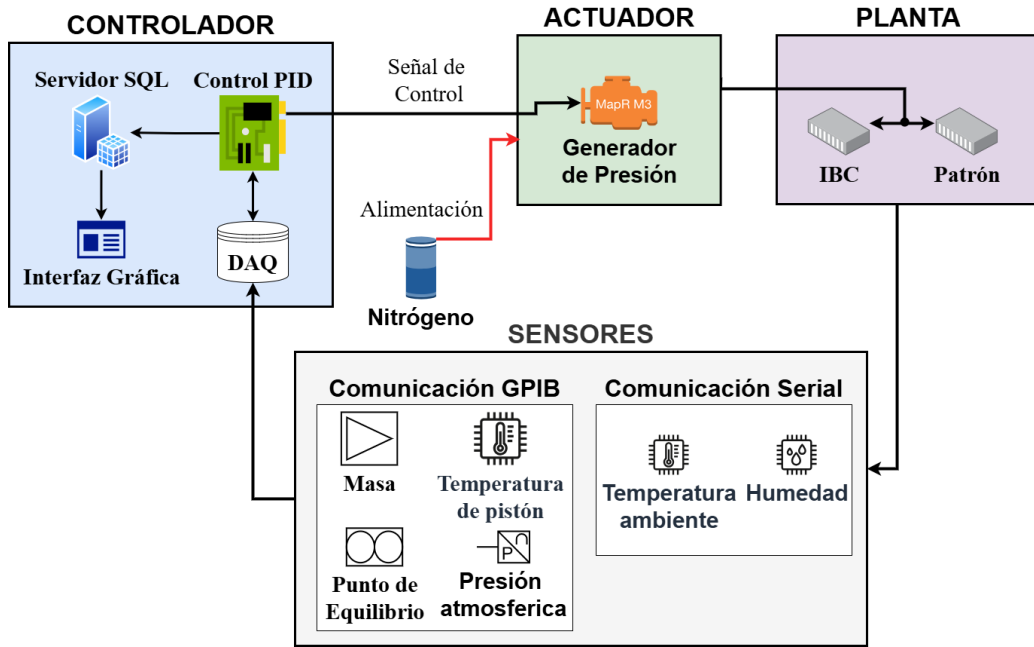


Figura 1.1. Diagrama del sistema de control propuesto.

Todo este proceso se desarrolla regulado por las normativas metrológicas vigentes, indicadas en [7, 8, 9].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Implementar la automatización en el sistema de control del volumen de flujo neumático para la calibración de equipos de presión, utilizando como patrón una balanza de pesos muertos, optimizando los tiempos en el proceso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar y comprender el proceso de calibración de instrumentos de presión.
- Seleccionar el método de control del flujo volumétrico aplicado en balanzas de pesos muertos.
- Diseñar un sistema de control que permita realizar el manejo de la presión en el proceso de calibración de manómetros y balanzas.

- Realizar simulación numérica del control en lazo cerrado e implementarlo en un prototipo experimental.
- Diseñar una interfaz que permita monitorear y controlar las variables térmicas, ambientales y de presión.

1.4. Justificación

El proceso de calibración de instrumentos manométricos utilizando como patrón una balanza de presión requiere la intervención de un operador para realizar ajustes de presión, registrar mediciones y verificar el punto de equilibrio del sistema. Este proceso, al realizarse de forma manual, puede implicar tiempos prolongados de operación y una mayor probabilidad de errores asociados al registro de los datos.

El desarrollo de un sistema automatizado para la adquisición de datos y control del proceso de calibración permite mejorar la eficiencia del procedimiento, reducir el tiempo del proceso y disminuir la posibilidad de errores derivados de la intervención humana.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto es viable debido a la disponibilidad de los instrumentos de medición y las herramientas de software empleadas para el desarrollo del sistema.

Finalmente, el desarrollo e implementación de este sistema contribuye al fortalecimiento de las capacidades de automatización en procesos metrológicos e industriales, así como al cumplimiento de los objetivos académicos del programa de posgrado, permitiendo la obtención del grado de Maestro mediante la generación de conocimiento aplicado en el área de instrumentación y control.

Capítulo 2

Estado del arte

En el ámbito de la calibración de equipos manométricos, la implementación de instrumentos primarios de presión es fundamental para garantizar exactitud y confiabilidad en las mediciones. Los sistemas de control de presión se han ido mejorado con el paso del tiempo, debido a la necesidad de precisión en diversas áreas e industrias como la energética, la automotriz, la alimentaria y farmacéutica.

También han ido evolucionando los controladores, entre ellos se destaca el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), control adaptativo y control digital avanzado. Este apartado explora las innovaciones y avances en los sistemas de regulación de presión. Se analizan los desarrollos de algoritmos y las tendencias tecnológicas que han optimizado la precisión y repetibilidad de estos procesos.

2.1. Regulación de presión en calibración

La automatización de la regulación de presión es prioridad para el proceso de calibración, ya que reduce los errores y eficienta los resultados. La implementación de técnicas automatizadas y tecnologías de monitoreo garantiza mediciones confiables, mejora la calidad de los procesos y contribuye a la sostenibilidad operativa. Estos avances no solo optimizan el desempeño de los sistemas, sino que garantizan seguridad, eficiencia y cumplimiento de estándares internacionales.

En [1] se aborda cómo la regulación precisa de presión en monitores fetales para medir presión intrauterina es esencial para la seguridad de los pacientes y la fiabilidad de las decisiones clínicas. Destaca el uso de los protocolos técnicos y estándares internacionales para asegurar la uniformidad en los equipos médicos, enfatizando la importancia de minimizar incertidumbres metrológicas en aplicaciones médicas críticas.

En [10] se determina que la implementación de reguladores, como válvulas proporcionales, junto con sistemas automatizados mejora la precisión y repetitividad en entornos de presión absoluta. Este avance no solo minimiza el error humano, sino que asegura el cumplimiento de estándares internacionales, reforzando la confiabilidad en aplicaciones industriales y científicas.

En [11] muestra la relevancia de los reguladores en el ajuste de presión en tiempo real,

integra la utilización de sensores y algoritmos para un monitoreo continuo que permite una optimización dinámica de la red de distribución asegurando un control preciso y sostenible en la operación de redes de distribución.

Si bien, los reguladores de presión son esenciales para mantener la estabilidad y el control en procesos de calibración, la precisión de dichos sistemas depende de la existencia de patrones de referencia confiables, que garanticen la trazabilidad de las mediciones. Las balanzas de presión generan presiones altamente exactas mediante pesos calibrados y representan uno de los métodos más precisos y confiables en la metrología de presión, ya que generan una sinergia crítica entre el control y la referencia.

2.2. Balanza de presión como patrón de referencia

Las balanzas de presión también conocidas como balanzas de pesos muertos, se consideran patrones primarios para calibrar manómetros y otras balanzas de menor exactitud, debido a que su principio de funcionamiento se fundamenta directamente en la segunda ley de Newton y en la relación $P = \frac{F}{A}$, lo que permite generar una presión a partir de magnitudes físicas fundamentales del Sistema Internacional. Estas herramientas funcionan generando una presión conocida mediante la carga de un pistón y un sistema de pesos calibrados [1].

En la Figura 2.1a se muestra la balanza con el pistón colocado, junto con sus pesas y la campana de vidrio, y en la Figura 2.1b se muestra el principio de calibración de presión utilizando la balanza de pesos muertos.

Además, si el equipo cuenta con trazabilidad metrológica al CENAM, donde han sido calibradas las masas y el área efectiva del pistón, se garantiza su condición de patrón primario y se sustenta su confiabilidad y exactitud en las mediciones realizadas.

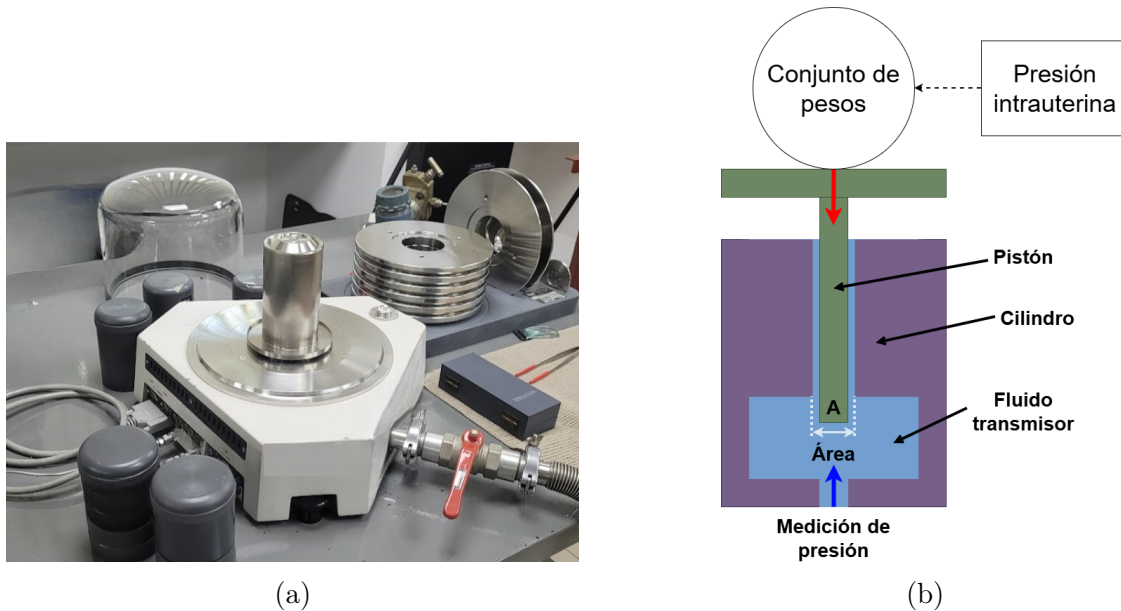


Figura 2.1. (a). Balanza de presión manométrica de patrón primario con sus masas y campana de vidrio. (b). Principio de calibración de presión mediante el método de peso muerto [1].

Comparación con otros patrones de presión

Comparadas con los transductores electrónicos, las balanzas de presión ofrecen ventajas significativas en términos de trazabilidad y precisión. En [5] se define que los transductores son más portátiles y rápidos. Los transductores son dispositivos que permiten hacer una señal eléctrica proporcional a la presión medida. La presión ejercida sobre el transductor provoca la deformación de los sensores mecánicos dentro del transductor, cuya deformación se puede medir. Sin embargo, no alcanzan al mismo nivel de estabilidad y exactitud que las balanzas de presión, en específico en aplicaciones que requieren mediciones a largo plazo.

Por lo que en [5, 12] determinan que las balanzas de presión son el estándar de patrones primarios en laboratorios metrológicos, ya que priorizan la incertidumbre mínima. Los avances recientes en su diseño han mejorado significativamente su eficiencia y precisión.

2.3. Sistemas de control para regulación de presión

La regulación precisa de la presión es esencial en sistemas de medición y calibración, donde las fluctuaciones pueden comprometer la exactitud y trazabilidad [3]. Es por ello que

los sistemas de control utilizados han evolucionado desde los métodos mecánicos básicos hasta sistemas que integran sensores y algoritmos de control automático [13].

2.3.1. Sistemas de control mecánicos

Este sistema realiza el control de la presión de manera manual, ajustando válvulas en función de mediciones observadas por el operador. Comúnmente, estos sistemas consisten en un tornillo de cuerda sin fin, donde el movimiento del pistón incrementa o disminuye la presión en cambios proporcionales [3]. Este control presenta varias limitantes significativas como la falta de precisión, errores por la intervención humana y lentitud en el proceso.

2.3.2. Sistemas electrónicos y automatización

La implementación de controladores PID marcó una gran relevancia en la regulación de presión, ya que permite ajustes más precisos, reduciendo el tiempo de respuesta en aplicaciones industriales y metrológicas, como el desarrollado por [13], que al integrar un sistema neumático con acumulador, una válvula proporcional, un transductor, un sistema Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) y un controlador PID proporciona un control eficiente y seguro de la presión en aplicaciones industriales.

La automatización ha permitido llevar los sistemas de control a niveles de precisión sin precedentes. En [13], se demuestra que los autómatas programables mantienen la estabilidad del sistema de manera eficiente.

2.3.3. Modelado y simulación de sistemas de presión

Debido a la gran variedad de factores ambientales que están involucrados en el proceso de regulación de presión, el modelado y la simulación han sido herramientas indispensables para el desarrollo de estrategias de control más precisas. En [14], se analiza como las dinámicas de sistemas neumáticos pueden optimizarse mediante el planteamiento de variables cruciales y la simulación de su comportamiento. Usando este enfoque, en [15] se muestra que es relevante comprender el comportamiento dinámico de las balanzas de presión, ya que persisten desafíos significativos como el control de comportamientos dinámicos complejos, la resonancia y el amortiguamiento.

Capítulo 3

Marco teórico

El manejo y control de la presión es un factor relevante en diversos procesos de la metrología y la industria, donde garantizar la trazabilidad y exactitud de las mediciones es esencial para cumplir con regulaciones y estándares. Por ello, los procesos de calibración desempeñan un papel importante, asegurando que los instrumentos de medición operen en rangos establecidos de precisión y confiabilidad.

El presente marco teórico presenta los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el desarrollo de un sistema automatizado de la regulación de presión en el proceso de calibración de manómetros.

Desde los principios básicos del proceso de calibración y los instrumentos empleados hasta los modelos matemáticos y la implementación de un sistema de control, se establecen las bases para comprender y desarrollar este sistema.

A lo largo del capítulo se muestran los principios físicos de la presión y su medición, los efectos que producen los cambios ambientales y la integración de herramientas como la Raspberry Pi 4, Python y bases de datos para un control eficiente. Además, se incluye un análisis de los elementos de comunicación y electrónica involucrados como la comunicación serial o Bus de Interfaz de Propósito General (GPIB), enfatizando la importancia de cada componente en la operación del sistema.

3.1. Calibración de equipos de presión

La calibración es la comparación de un instrumento de valor conocido y referenciado a patrones nacionales con otro instrumento. La calibración periódica de un instrumento asegura un mejor rendimiento del equipo y mantiene su confiabilidad [16].

La calibración de equipos medidores de presión es un proceso que consiste, en términos simples, en conectar dos equipos: el equipo a calibrar y el equipo patrón a una fuente de alimentación neumática y aplicar una serie de presiones conocidas comparando las mediciones obtenidas. En la Figura 3.1 se puede apreciar un diagrama de flujo del proceso de calibración que se realiza, donde los procedimientos se diferencian por una escala de colores para determinar qué procesos se van a automatizar, cuáles involucran el apoyo de cambios de manera manual y cuáles procesos se mantienen sin ningún cambio. Dicho

proceso se puede dividir en varias etapas, las cuales son:

1. Previa. Se realiza la revisión visual y limpieza del Instrumento Bajo Calibración (IBC), además de la selección de los instrumentos de apoyo y del equipo patrón.
2. De pre-carga. En esta se conecta el IBC y patrón al sistema de alimentación y se realizan dos ciclos ascendente y descendente de 0% y 100%
3. De trabajo. Consiste en aplicar una presión conocida al IBC y patrón, esperar al punto de estabilidad, comparar las mediciones y repetir el proceso hasta completar dos ciclos ascendente y descendente de de 0% a 100% en intervalos de 10%.
4. De cálculos. Después de calibrar se calcula la repetibilidad, la histéresis y se estiman los errores de medición del instrumento.
5. De registro. Los valores obtenidos de la calibración y del análisis se documentan en un informe a menudo referido como “Informe de Calibración” [8, 16].

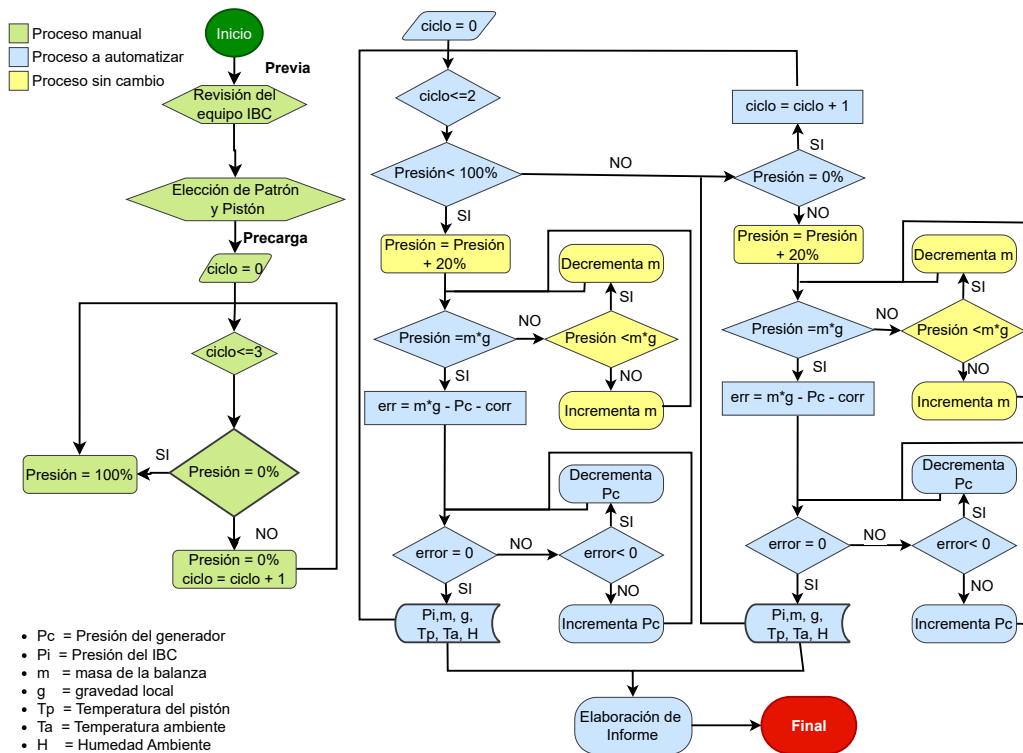


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de calibración.

Cada etapa del proceso de calibración desde la preparación inicial hasta la generación del certificado final, tiene como objetivo garantizar que las mediciones realizadas sean fiables, consistentes y trazables a patrones nacionales e internacionales. La trazabilidad metrológica es clave en este contexto, ya que establece una cadena ininterrumpida de comparaciones que vincula las mediciones realizadas durante la calibración a un patrón internacional [6]. Lo que permite evaluar la validez de las mediciones a lo largo del tiempo. Este principio se respalda por normativas nacionales e internacionales como la ISO/IEC 17025, la NOM-013-SCFI o la NMX-CH-3, que establecen requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración y los instrumentos de medición. La trazabilidad y el cumplimiento de la normativa nacional no solo garantizan la precisión y fiabilidad de las mediciones, sino que también fortalecen la confianza en los resultados obtenidos, especialmente en aplicaciones críticas como la calibración de equipos manométricos.

3.2. Equipos utilizados en la calibración

La elección adecuada de los instrumentos de calibración es fundamental, ya que su desempeño influye directamente en la exactitud de las mediciones y en la trazabilidad de los resultados obtenidos. Estos instrumentos no solo permiten realizar las mediciones necesarias, sino que también aseguran el cumplimiento de los estándares.

En este apartado, se describen los instrumentos utilizados en el sistema de calibración, destacando sus características, funciones y roles específicos en cada etapa del proceso. Entre los equipos se incluyen las balanzas de presión como patrones de referencia, el barómetro, el termohigrómetro, el generador de presión, y los sistemas de control y comunicación necesarios para integrar el proceso como se muestra en la Figura 3.2.

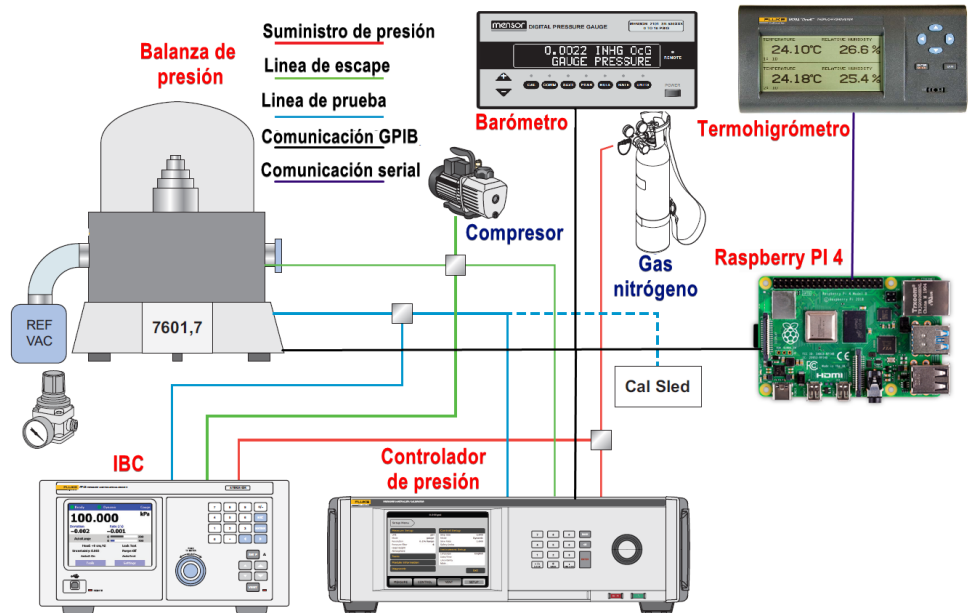


Figura 3.2. Diagrama de conexiones del sistema de calibración.

3.2.1. Balanza de presión

Las características y propiedades de la balanza de presión se presentaron en el Capítulo 2. En esta sección, se profundizará en los componentes principales de la balanza empleada en el proyecto, considerando su rol en el sistema de calibración automatizado. Así como la inclusión de aspectos como su rango operativo, la precisión de las mediciones y su integración con los sistemas de control. La balanza de pesos muertos se puede apreciar en la Figura 3.3, y se compone de lo siguiente:

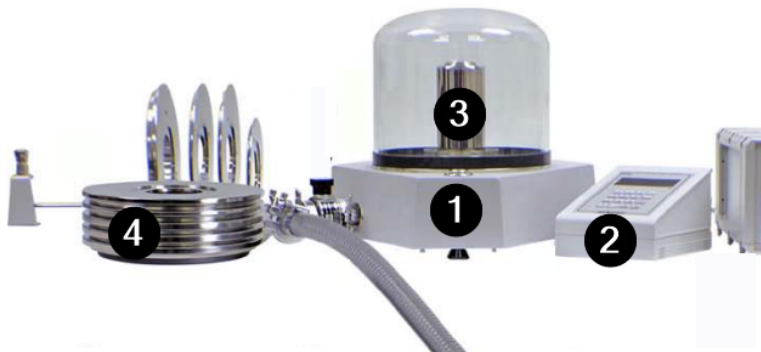


Figura 3.3. Componentes básicos de una balanza de presión típica en el proceso de calibración.

1. Plataforma. Base del equipo el cual el ensamble pistón-cilindro son montados junto con las masas. En su interior cuenta con el sistema de medición, sensores de distancia y temperatura, y microprocesador. En la parte externa cuenta con puertos de comunicación serial y GPIB, así como entrada de alimentación de gas.
2. Terminal de gestión. Componente que permite controlar las funciones de la balanza y monitorizar su funcionamiento a través de una pantalla LCD y un teclado matricial.
3. Ensamble cilindro-pistón. Consiste en un pistón cilíndrico que se inserta dentro de un cilindro hueco. Generalmente el porta-pesas se considera parte del ensamble. Su función es convertir la presión a una fuerza de manera proporcional. En la Tabla 3.1 se muestran las propiedades de los conjuntos ensamble cilindro-pistón que se emplean en el proceso.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de los ensambles cilindro-pistón utilizados en la balanza de pesos muertos [3].

Características	Unidades	Pistón Baja	Pistón Media	Pistón Alta
Intervalo de presión nominal	kPa	20 a 5000	1000 a 50000	200 a 1×10^6
Intervalo de presión calibrada	kPa	499.13 a 4987	997.814 a 40868	99754 a 4987000
Fecha de calibración	dd-mm-aa	10-05-22	05-04-22	28-03-22
Área efectiva (A_o)	m ²	9.8067×10^{-5}	9.80654×10^{-6}	4.90256×10^{-6}
Incertidumbre de área	m ²	1.20×10^{-8}	3.30×10^{-10}	1.50×10^{-10}
b	Pa ⁻¹	-7.00×10^{-12}	-2.6×10^{-14}	-1.28×10^{-12}
Incertidumbre de b	Pa ⁻¹	9.20×10^{-12}	2.60×10^{-13}	1.80×10^{-13}
α	°C ⁻¹	9.00×10^{-6}	9.00×10^{-6}	9.00×10^{-6}
ρ_m	kg/m ³	7920	7920	7920
Diámetro de pistón	mm	11	3.6	2.5
Circunferencia de Pistón	m	0.03455752	0.01130973	0.00785398

4. Juego de pesas. Conjunto de discos con masas específicas y diferentes valores nominales, con lo que permiten aplicar una cierta cantidad de presión dependiendo de su valor. La estabilidad de estos pesos es crucial. La Tabla 3.2 presenta un resumen de las propiedades físicas del conjunto de masas utilizadas en la balanza de pesos

muertos. La tabla completa con el detalle individual de cada masa se presenta en el Anexo A.

Tabla 3.2. Resumen de las propiedades físicas del juego de masas utilizado en la balanza de pesos muertos.

Parámetro	Rango observado
Valores nominales	0.01 g – 5000 g
Corrección de masa	–11.86 mg a +7.39 mg
Incertidumbre real	0.0023 mg – 2.51 mg
Volumen	0.00126 cm ³ – 631.31 cm ³
Incertidumbre de volumen	7.36 × 10 ⁻⁶ – 3.64 cm ³
Densidad de las pesas	7920 – 15600 kg/m ³

3.2.2. Funcionamiento de la balanza de presión

El principio fundamental de las balanzas de pesos muertos se basa en la relación entre la fuerza aplicada por un peso y el área del pistón, donde un peso conocido ejerce una fuerza sobre un pistón de área definida para generar presión [17, 18]. Este método asegura trazabilidad directa a patrones internacionales mediante la medición de la masa y el área efectiva del pistón, como se observa en la Figura 3.4.

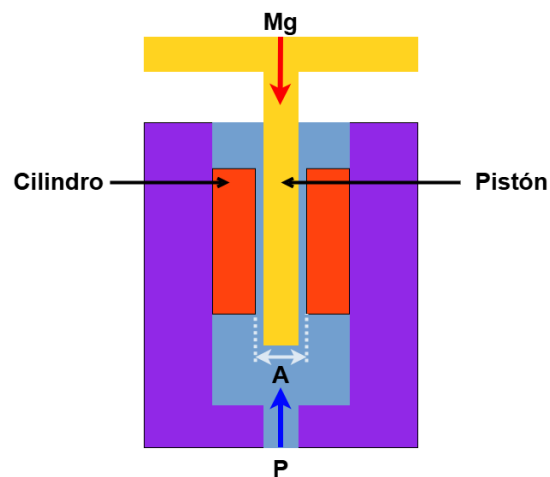


Figura 3.4. Diagrama de fuerzas en el ensamble cilindro-pistón.

En las balanzas de presión utilizadas ampliamente en centros de investigación, la alta precisión se complementa con ajustes automáticos que compensan factores como la

flotabilidad del aire y las variaciones de temperatura. Al alcanzar el equilibrio entre la presión aplicada a la balanza y la fuerza ejercida por las masas sobre el pistón, éste flota y se mantiene con la presión estable [17]. La presión se puede calcular mediante (3.1) o medida por un manómetro simple.

$$P = \frac{\sum_i M_i g_l \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) + \pi D \tau}{A_{(T_r, P_r)} [1 + (\alpha_p + \alpha_c) (T - T_r)] (1 + \lambda P)} - \rho_r g_l h \quad (3.1)$$

Donde:

P : Presión generada por la balanza de presión (Pa).

M_i : Masa del elemento i colocado sobre el pistón (kg).

g_l : Aceleración de la gravedad local (9.781506 m/s²).

ρ_a : Densidad del aire ambiente (kg/m³).

ρ_m : Densidad del material de las masas patrón (kg/m³).

D : Diámetro del pistón (m).

r : Radio efectivo del pistón (m).

A : Área efectiva del conjunto pistón-cilindro (m²).

α_p : Coeficiente de expansión térmica del pistón (1/K).

α_c : Coeficiente de expansión térmica del cilindro (1/K).

T : Temperatura del pistón-cilindro durante la medición (K).

T_r : Temperatura de referencia del área efectiva (K).

λ : Coeficiente de deformación por presión del conjunto pistón-cilindro (1/Pa).

Δ : Diferencia de presión respecto a la presión de referencia (Pa).

ρ_r : Densidad del fluido de transmisión de presión (kg/m³).

h : Diferencia de altura entre el nivel de referencia del pistón y el punto de medición (m).

Cada valor de presión que se requiere generar depende del pistón utilizado, así como también de las masas empleadas, recordando que el valor de la presión depende de la fuerza ejercida sobre un área específica (pistón). Este modelo de balanza utiliza un cilindro-pistón

operado con fluido, comúnmente nitrógeno.

Este principio es clave para garantizar la trazabilidad metrológica, como se describe en [6, 12], que enfatizan su capacidad para mantener la estabilidad a alta presión, así como que dichos instrumentos ofrecen una alternativa robusta y fiable para calibrar equipos en condiciones controladas.

3.2.3. Características técnicas y avances del modelo

La balanza de presión utilizada destaca por su capacidad de cubrir un amplio intervalo de mediciones, que va desde valores bajos de presión (3 kPa) hasta valores de alta presión (1 GPa), manteniendo una incertidumbre mínima. El sistema de control propuesto genera un avance significativo en su sistema automatizado, que reduce la intervención en la captura de los datos reduciendo el error humano. Dicho sistema es descrito en [19], permite una calibración más eficiente y precisa en comparación con los métodos manuales tradicionales. Las propiedades y condiciones que se deben mantener para el correcto funcionamiento de la balanza de presión se pueden apreciar en la Tabla 3.3.

Además, tiene la capacidad de combinar la precisión tradicional con innovaciones modernas. Este avance reduce la intervención humana, los errores sistemáticos y mejora la repetibilidad en la calibración de alta presión. Basándose en [5], estas características permiten diferenciar las balanzas modernas de los diseños tradicionales, lo que permite disminuir la incertidumbre.

Sin embargo, enfrentan desafíos en condiciones de alta presión, donde condiciones ambientales como la temperatura, la densidad del fluido y la densidad del aire deben ser controladas. En [20] destaca la utilización de sistemas de monitoreo ambiental avanzados para reducir las perturbaciones asociadas a dichas variables.

Tabla 3.3. Propiedades de la balanza de presión del modelo utilizada.

Propiedades	Descripción
Requerimientos de energía	85 a 264 VAC, 50/60 Hz, 22VA max.
Rango de operación de temperatura	15 a 35°C
Rango de operación de humedad	5 a 95 % R.H
Peso	
Plataforma	13 Kg
PG Terminal	1.4Kg
Microprocesador	Motorola 68302
Puertos de comunicación	Tres puertos COM, un puerto IEEE-488
Rango de presión	3 kPa a 7 MPa (1 a 1000 psi), manométrica y absoluta.
Medio de operación	Gas: Aire, Helio, Nitrógeno.
Carga máxima de masa	100kg, mientras no exceda 11MPa (1600psi)
Material del pistón y cilindro	Carburo de tungsteno
Posición del pistón	
Rango	4.5 mm
Resolución	0.1 mm
Incertidumbre de medición	0.2 mm
Rotación de pistón	
Rango	2 a 99 rpm
Resolución	1 rpm
Temperatura ambiente	
Rango	0 a 40°C
Resolución	0.1
Incertidumbre de medición	1
Temperatura del modulo cilindro-pistón	
Rango	0 a 40°C
Resolución	0.01

3.2.4. Controlador de presión

Instrumento robusto y fiable que facilita la calibración de presión neumática, ya que permite medir, generar y controlar la presión en diferentes equipos o sistemas. Existen diferentes maneras de controlar la presión, ya sea por regulación del flujo volumétrico, mediante una bomba o compresor de aire, o por combinación de activación o desactivación de válvulas y pistones [8]. En el desarrollo de esta tesis, se procedió a reemplazar el controlador de volumen de flujo mecánico por un controlador de presión electrónica modular debido a las limitaciones técnicas y operativas que presenta el controlador mecánico y las ventajas

que ofrece el nuevo equipo (Figura 3.5).



Figura 3.5. Controladora de presión sugerida.

Las limitaciones que presentaba el sistema anterior eran las inexactitudes en la presión debido a operar el flujo volumétrico, la complejidad de conexiones para manejar varios rangos de presión y la dependencia de las afectaciones de las variaciones ambientales.

En el nuevo sistema se implementa una controladora que mantiene la presión con gran precisión y confiabilidad debido a un sistema de válvulas y reguladores de presión que controlan la presión generada o recibida, ajustando con una gran precisión los valores definidos por el usuario.

La controladora de presión utiliza sensores de presión y temperatura integrados para monitorear tanto la presión generada como la variación de temperatura y por medio de algoritmos y compensación térmica, minimizar los errores. Las propiedades técnicas del controlador se muestran en la Tabla 3.4, donde se puede apreciar que dichos valores son compatibles con el equipo patrón.

Tabla 3.4. Propiedades del controlador de presión del modelo utilizado [4].

Propiedades	Descripción
Requerimientos de energía	100 V CA a 240 V CA, 47 Hz a 63 Hz
Rango de operación de temperatura	15°C a 35°C
Fusible	T2A 250 V CA
Puertos de comunicación	Tres puertos COM, un puerto IEEE-488, Ethernet y USB
Rango de presión	0 MPa a 7 MPa
Medio de operación	Nitrógeno de calidad industrial, 99.5 %
Incertidumbre de Instrumento %FS	0.02
Incertidumbre de precisión %FS	0.01

La implementación de la controladora de presión permite abordar las limitaciones del

sistema anterior, garantizando un control más estable y preciso de la presión, permitiendo que los resultados de las pruebas experimentales sean confiables.

3.2.5. Barómetro

De acuerdo a las normas en el proceso de calibración de equipos manométricos [7, 8], la medición de la presión atmosférica debe tener una exactitud de 1 mm de Hg o mejor. El barómetro es un instrumento para determinar la presión atmosférica; el sensor interno mide la presión absoluta del aire circundante, mostrando la presión atmosférica en unidades de medida como hPa, mbar o psi, dependiendo de la configuración del usuario. Como se muestra en la Figura 3.6.

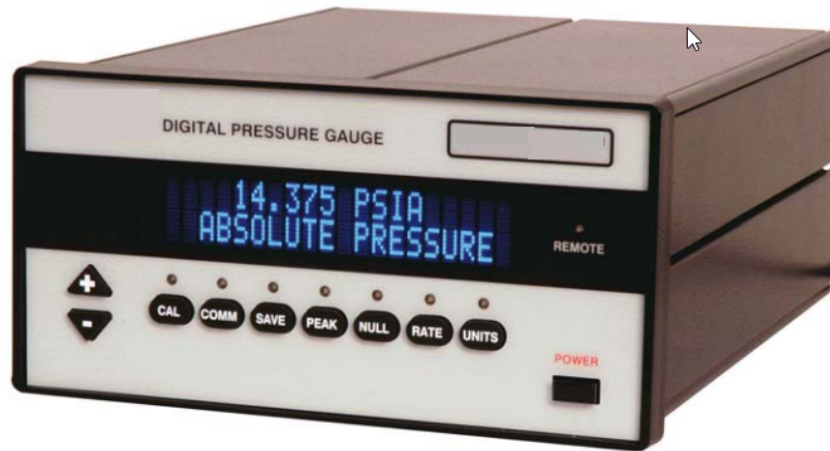


Figura 3.6. Medidor de presión atmosférica sugerido.

Los sensores de alta resolución y estabilidad del instrumento utilizado permiten lecturas precisas ante las fluctuaciones en las condiciones ambientales. El rango de presión absoluta va de 800 hPa a 1100 hPa, con una incertidumbre de 0.010 % del valor mostrado, correspondiendo al rango habitual de la presión atmosférica al nivel del mar y altitudes moderadas [21].

El barómetro es capaz de mantener la estabilidad de las mediciones a largo plazo, y permite visualizar los valores en pantalla del equipo o transmitir las mediciones a sistemas externos mediante interfaces de comunicación, como RS-232 o GPIB para registro y análisis.

3.2.6. Termohigrómetro

Para la calibración de acuerdo a la norma [8] se necesita una exactitud de 2 % Humedad Relativa (HR) y 1 °C para determinar la humedad y la temperatura ambiente.

Por ello, se utiliza un termohigrómetro, que es un registrador de datos de temperatura y humedad de alta precisión diseñado para aplicaciones en entornos controlados. Sus sensores intercambiables almacenan sus datos de calibración, lo que permite reemplazarlos sin necesidad de volver a calibrar el dispositivo (Figura 3.7).

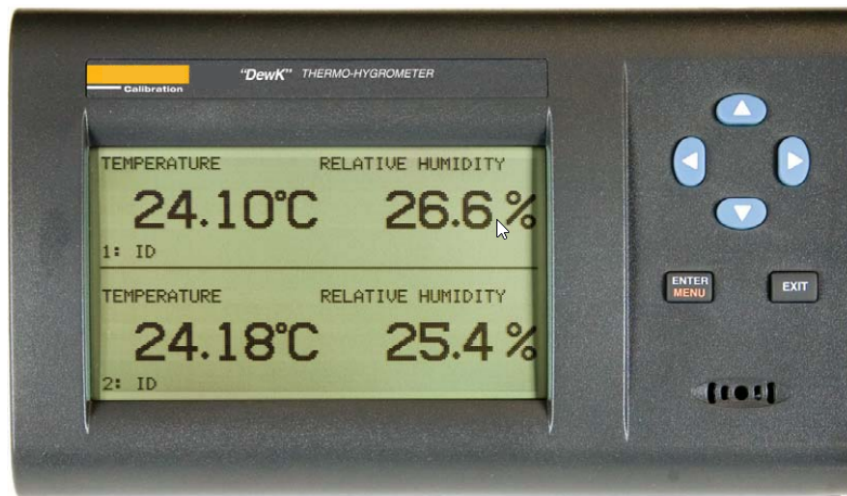


Figura 3.7. Termohigrómetro utilizado en el sistema de calibración.

El termohigrómetro tiene una medición precisa de temperatura, con un rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y una precisión de $\pm 0.125\text{ }^{\circ}\text{C}$; para la HR, el rango va de 0 % a 100 % HR, con una precisión de $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{HR}$. Permite diferentes opciones de comunicación como Ethernet, RS-232 y puerto Bus Universal en Serie (USB), lo que permite el monitoreo remoto y la transferencia de datos [22].

Aunque los instrumentos cuenten con sistemas de estabilidad y corrección de errores que permiten garantizar mediciones confiables y precisas de manera individual, el control eficaz de estas variables requiere un sistema que permita procesar los datos en tiempo real, realizar ajustes automáticos y gestionar de manera eficiente la comunicación entre los diferentes componentes del sistema de calibración.

Para abordar esta problemática, la tarjeta Raspberry Pi 4 se integra como el núcleo del

sistema de control, proporcionando una plataforma versátil y de alto rendimiento. Este equipo no solo permite procesar y analizar las señales de los instrumentos y sus sensores, sino que también implementa algoritmos de control, la gestión de la comunicación y el almacenamiento de los valores en una base de datos.

3.2.7. Raspberry Pi 4

En esta sección, se describirán las características principales de la Raspberry Pi 4, su procesamiento, los protocolos de comunicación y su importancia en la implementación del sistema de control automatizado para la calibración de equipos manométricos.

La Raspberry Pi 4 es un ordenador en pequeña placa electrónica que permite la configuración y utilización de puertos GPIO, permite trabajar en diferentes lenguajes de programación como JavaScript, C, C++, Python, así como diversos programas de licencia libre. Además, permite trabajar con diferentes protocolos de comunicación y utiliza sistemas operativos open source [23]. Las características del modelo a utilizar son:

Propiedades técnicas

- Procesador: Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-Bbit SoC @ 1.5 GHz.
- Memoria RAM: 8GB LPDDR4-3200 SDRAM.
- Gráficos: GPU VideoCore VI 3D.
- Almacenamiento: Tarjeta SDXC 64GB Clase 10A1.
- Sistema Operativo (OS): Raspberry PI OS (64-bit).
- Puertos GPIB: 28 puertos GPIO BCM2711 a través de conector estándar de 40 pines a 3.3V.

Interfaces

- Wireless LAN 802.11 b/g/n/ac.

- 2 puertos USB 2.0 y 2 USB 3.0.
- 1 puerto Gigabit Ethernet con soporte de Alimentación por Ethernet (PoE).
- 28 puertos Entrada-Salida de Propósito General (GPIO) que soportan varias opciones de interfaces.

Su utilización permite desarrollar distintas aplicaciones por la variedad de programas y lenguajes que maneja, la posibilidad de controlar su procesador, memorias y componentes de manera directa, el almacenamiento de la información, así como la instalación y comunicación de diferentes dispositivos o interfaces adicionales.

Por ello, la Raspberry Pi4 desempeña un papel central en el sistema de calibración, sin embargo, su efectividad depende de la capacidad de comunicarse de manera eficiente con los instrumentos de medición, el generador de presión y la balanza patrón. En base a esto, la comunicación se vuelve clave para garantizar que los componentes trabajen de manera precisa y en tiempo real. Esto incluye tanto la adquisición de datos como la transmisión de señales de control y la interacción con las bases de datos.

3.3. Sistemas de comunicación

A continuación, se describirán el funcionamiento y la importancia de los protocolos de comunicación implementados en el sistema, destacando los protocolos de comunicación que permiten la interacción entre la Raspberry Pi 4, los dispositivos externos y las herramientas de almacenamiento de datos.

3.3.1. Protocolos de comunicación

Existen dos maneras de transmitir datos, la comunicación paralela y la comunicación en serie [24]. En la primera se envían un conjunto de dígitos binarios simultáneamente a través de un conductor por cada bit que se envía; en la segunda se envían los datos bit a bit por un solo conductor. Por esto, es necesario un protocolo para determinar los datos tanto de envío como de recepción. En la Figura 3.8 se muestra un ejemplo tanto de comunicación paralela como en serie.

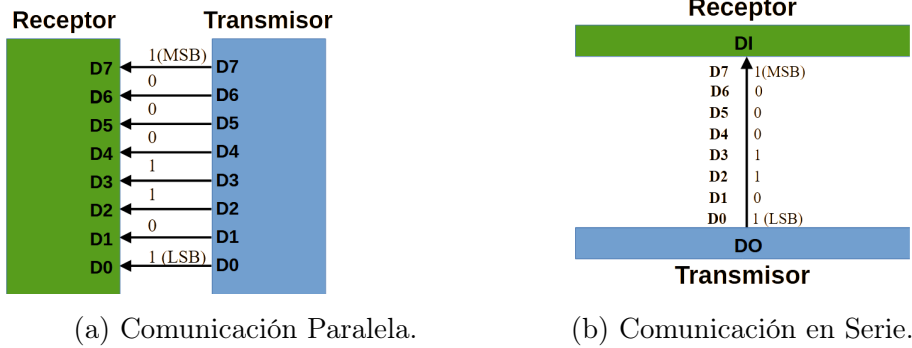


Figura 3.8. Modalidades de transmisión de datos.

En los subsecuentes apartados se muestran los protocolos de comunicación más relevantes, tanto para la comunicación en paralelo como para la comunicación en serie, dando relevancia a sus características técnicas y al aspecto de la interfaz de acceso.

Protocolo RS-232 de comunicación serial

El protocolo RS-232 solo permite una conexión punto a punto, con una longitud máxima de 15 m. La velocidad de transferencia de datos es de 15 kbit/s de manera estándar. Puede trabajar tanto en half-duplex como en full-duplex y para realizar la comunicación se emplea un conector de tipo DB-9 que consta de 9 pines, cuya configuración de señales y puerto se muestra en la Figura 3.9 [2].

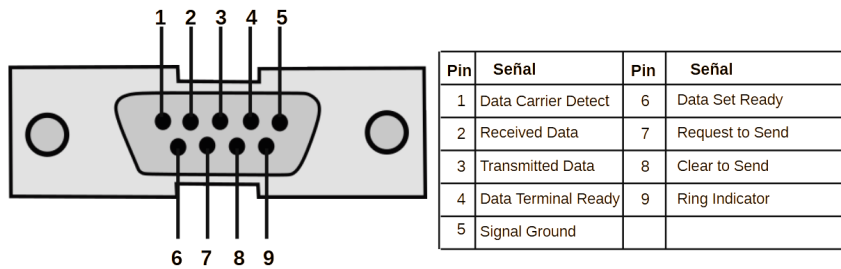


Figura 3.9. Puerto DB-9.

Protocolo IEEE-488 de comunicación GPIB

En la norma IEEE-488 se definen las características mecánicas, eléctricas y operativas de la comunicación GPIB, entre ellas un máximo de 15 dispositivos conectados a un bus GPIB, los cuales no pueden superar 20 metros en total y 2 metros entre dispositivos.

El cable está compuesto por 16 conductores, 8 se utilizan para transmisión de datos y 8 para gestión y el estado del sistema. Solo puede trabajar en full-duplex, mientras las líneas de control tienen funciones específicas: ATN (Attention), REN (Remote Enable), IFC (Interface Clear), SRQ (Service Request), EOI (End or Identify), DAV (Data Valid), NRFD (Not Ready For Data) y NDAC (Not Data Accepted). Las tres últimas líneas se encargan del control de transferencia de datos, mientras las demás se encargan del control general. En condiciones ideales, la tasa promedio de transferencia de datos de 1 MB/s [2].

En la Figura 3.10 se muestra el puerto de un cable de comunicación GPIB con 24 conductores y su asignación de las funciones a cada conductor.

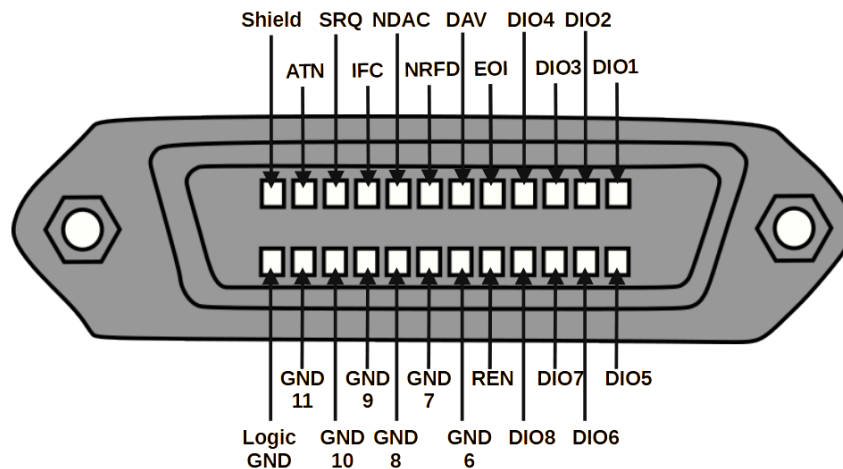


Figura 3.10. Disposición y funciones de cada uno de los pines de un puerto GPIB.

3.3.2. Universal Serial Bus (USB)

Es un estándar de comunicación serial que especifica las propiedades de los conductores, puertos y protocolos empleados para la conexión y comunicación entre equipos mediante un bus. En la parte eléctrica, utiliza un par trenzado para la transmisión de datos, niveles de voltaje de 2.8 V y 3.6 V para emitir 1 y entre 0 V y 0.3 V para el caso de 0 y su tasa de transferencia que va de 1.5 Mbit/s (USB 1.0) a 20 Gbit/s (USB 3.1). Debido a la evolución que ha tenido dicho protocolo, el aspecto y las conexiones del puerto USB han cambiado; en la Figura 3.11 se muestra el diseño de los diferentes puertos [2].

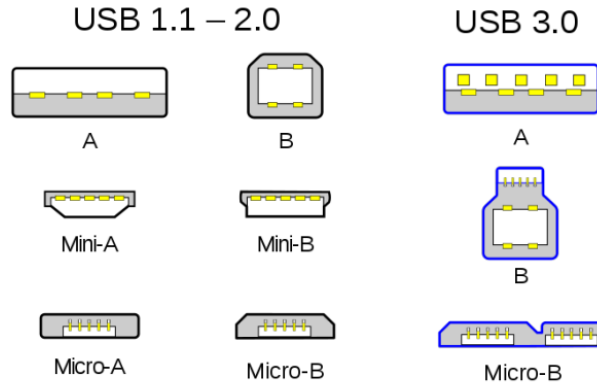


Figura 3.11. Tipos de puertos USB [2].

3.3.3. Conversión USB a serial y GPIB

Los diferentes tipos de comunicación, como la serial o la GPIB, presentan características únicas, como el número de conductores, la velocidad de transferencia de datos, la forma del puerto, el alcance máximo, los niveles de voltaje, entre otros. De los tres protocolos de comunicación, el USB es el más utilizado actualmente ya que muchos dispositivos modernos carecen de puertos seriales o GPIB.

Para lograr una comunicación entre un puerto USB y un puerto serial, se utiliza un dispositivo denominado convertidor. Este adaptador traduce las señales entre el estándar USB y el estándar serial RS-232, permitiendo que los dispositivos se comuniquen correctamente. De igual manera, para la comunicación entre USB y GPIB se utiliza un dispositivo similar que convierte las señales del estándar USB en señales del estándar IEEE-488. En la Figura 3.12a se puede apreciar el convertidor USB-SERIAL y en la Figura 3.12b se muestra el convertidor USB-GPIB.

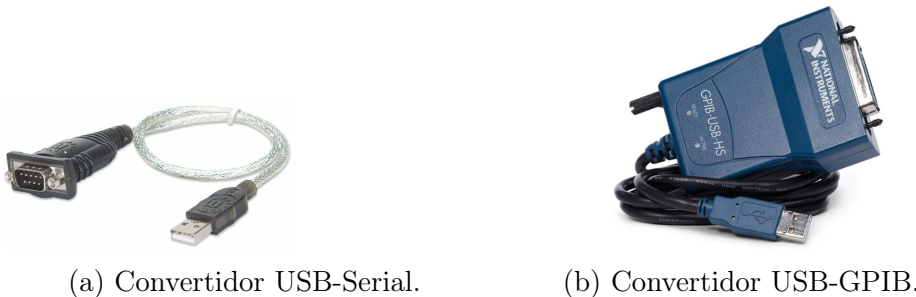


Figura 3.12. Convertidores de USB a diferentes protocolos.

3.3.4. Interacción entre Raspberry PI e instrumentos

La Raspberry como núcleo del sistema, requiere interactuar de manera continua con los diferentes componentes para garantizar un control preciso y eficiente. Estas interacciones incluyen la adquisición de datos, el enviar señales de control y la gestión de la comunicación. Debido a ello y a la gran variedad de sistemas operativos y configuraciones que puede manejar el dispositivo, es necesario determinar el lenguaje de programación, las librerías y las aplicaciones para poder ejecutar interfaces gráficas que permitan monitorear, almacenar, generar reportes y controlar el proceso de calibración en tiempo real.

Los componentes necesarios para la interacción del sistema incluyen el barómetro, el higrómetro–termómetro, la balanza de presión, la Raspberry Pi, así como los convertidores de comunicación serial–USB y USB–GPIB, que permiten establecer la comunicación entre los instrumentos y el sistema de control. El software implementado en la Raspberry Pi 4B se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Software básico utilizado en la Raspberry Pi 4B.

Programa	Función
Python 3	Lenguaje de programación que permite controlar y comunicar todos los componentes del sistema desarrollado en la Raspberry Pi.
PyQt5	Biblioteca para desarrollar interfaces gráficas de usuario (GUI) o instrumentos virtuales utilizando Python.
PyVISA	Librería para la comunicación con instrumentos mediante protocolos como GPIB, RS-232, USB y Ethernet.
MariaDB	Sistema de gestión de bases de datos para almacenar, organizar y administrar la información generada durante el proceso de calibración.
Linux-GPIB	Controlador que habilita la comunicación con dispositivos que utilizan el protocolo GPIB en sistemas basados en Linux.

Se utiliza Python 3, PyQt5 y MariaDB, debido a su compatibilidad con la tarjeta Raspberry Pi y con el sistema operativo Linux. Estas herramientas son software libre, lo que permite su implementación sin restricciones de licencia. Además, su integración facilita el desarrollo de la interfaz gráfica, la comunicación con los instrumentos y el almacenamiento de los datos.

Con los programas previos se determina el proceso de configuración inicial de la

Raspberry Pi 4B, el cual permite trabajar de manera más óptima, dicho proceso se observa en el diagrama de la Figura 3.13.

La implementación de una correcta comunicación entre los componentes del sistema garantiza la adquisición de datos precisos y la ejecución oportuna de los comandos de control. Sin embargo, para optimizar el desempeño del sistema es necesario contar con un modelo matemático que permita describir el comportamiento de las variables involucradas y predecir su respuesta ante diferentes condiciones.

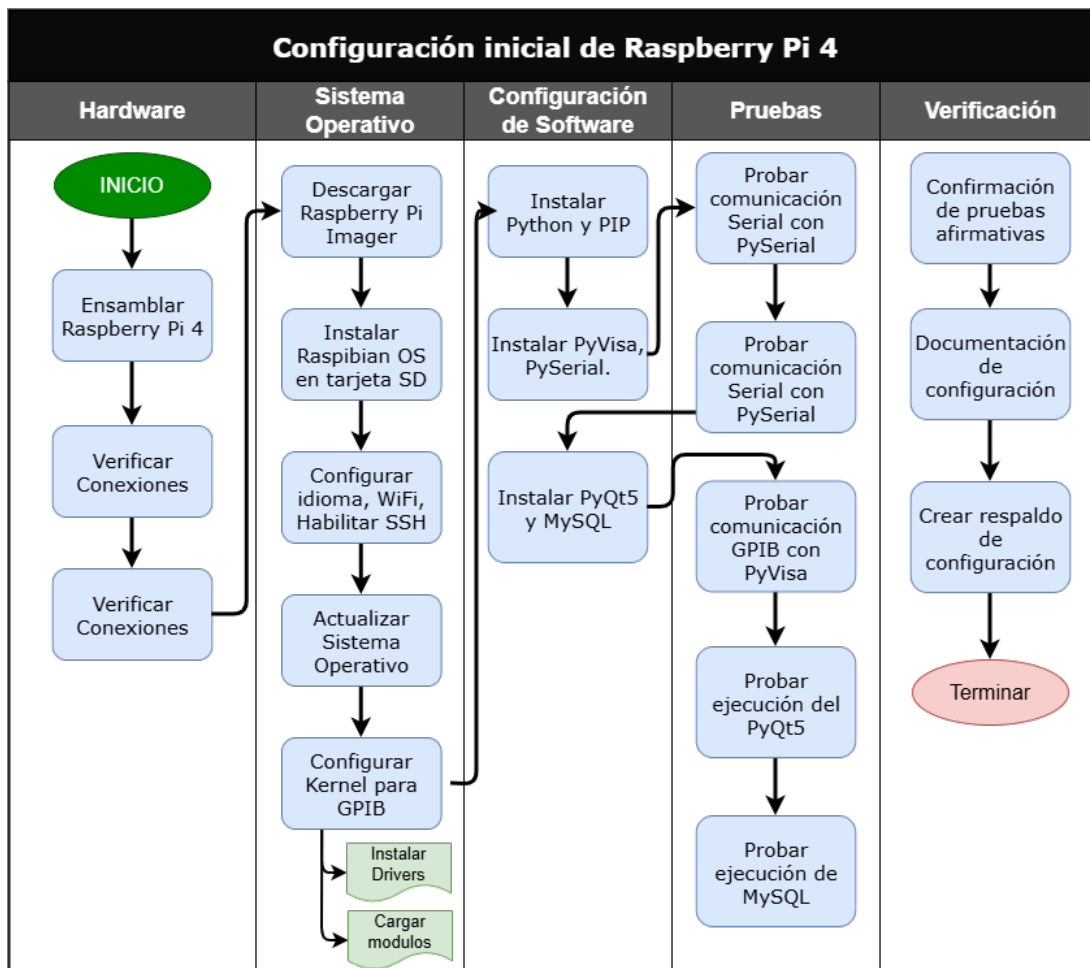


Figura 3.13. Configuración inicial de la Raspberry.

3.4. Parámetros físicos del sistema de balanza de presión

Las fórmulas matemáticas de las condiciones ambientales del sistema sirven para describir las relaciones físicas que influyen en el proceso de calibración de manómetros como la presión, la fuerza de empuje del aire, las correcciones por cambio de gravedad, el cambio de temperatura, la carga hidrostática y cuantificar la incertidumbre asociada. Este modelo permite no solo una mejor comprensión del comportamiento del sistema, sino también el ajuste de los parámetros de control.

En lo siguiente, se describirán las ecuaciones fundamentales del sistema de calibración. Estas incluyen las relaciones físicas de la presión, la flotabilidad del aire y los factores de corrección por propiedades debidas al medio ambiente.

3.4.1. Fórmula de la presión

La presión ocurre por la aplicación de una fuerza perpendicular (F_n) que actúa sobre una superficie determinada A . La presión se define con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{F_n}{A} \quad (3.2)$$

La magnitud de presión P se expresa con la unidad de Pa (Pascal) [16]; esta es una unidad derivada expresada en la NOM-008-SE-2021. Un “Pa” expresado en unidades base es igual a:

$$Pa = \frac{kg}{ms^2} = \frac{N}{m^2}$$

La fuerza se puede generar de diferentes maneras: por acumulación de moléculas de gases o fluidos, o por la aplicación de masas. Para calcular la fuerza se aplica la segunda ley de Newton, que se puede apreciar en la fórmula.

$$F = ma \quad (3.3)$$

donde F es la fuerza aplicada, m representa la masa y a la aceleración del cuerpo. Para una superficie horizontal, cuando solo el peso y las fuerzas normales actúan sobre el objeto

en (3.3) se convierte en (3.4), donde el valor de la masa se conserva, pero la aceleración se determina por la aceleración gravitacional g , cuyo valor es de 9.81 m/s^2 .

$$F_n = mg. \quad (3.4)$$

3.4.2. Correcciones de la presión

La fórmula mostrada en (3.4) representa la presión del sistema considerando un comportamiento ideal, sin embargo, esto no es posible en la vida real. En particular, se implementan 4 factores de corrección debido a las condiciones ambientales y la ubicación del equipo. Estas son: la corrección por gravedad, la corrección por temperatura, la corrección por carga hidrostática y la corrección por empuje de aire.

Corrección por gravedad

Esta corrección ocurre debido a la diferencia entre la gravedad local y la gravedad a la cual se realizó la calibración de la balanza de pesos muertos. La corrección se realiza de la siguiente manera:

$$P_G = P_N \left(\frac{gl}{gs} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

P_G : Valor de presión corregido por gravedad (Pa),

P_N : Valor nominal de presión (Pa),

gl : Aceleración de la gravedad local ($9.781.506 \text{ m/s}^2$).

gs : Aceleración de la gravedad estándar (9.805665 m/s^2)

Corrección por temperatura

Esta corrección se realiza en las lecturas cuando se utiliza una temperatura de trabajo diferente de $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, y se realiza de la siguiente manera:

$$P_T = P_G \left(\frac{1}{1 + \alpha_{c-p}(t - t_{ref})} \right) \quad (3.6)$$

Donde:

P_G : Valor de presión corregido por gravedad (Pa),

α_{c-p} : Coeficiente de dilatación térmica del conjunto pistón-cilindro ($^{\circ}\text{C}^{-1}$),

t_{ref} : Temperatura de referencia de calibración del conjunto pistón-cilindro ($^{\circ}\text{C}$).

t : Temperatura del conjunto cilindro-pistón en el momento de calibración ($^{\circ}\text{C}$)

P_T : Valor de presión corregido por temperatura y gravedad (Pa),

Corrección por carga hidrostática

Esta se realiza cuando el nivel de referencia del patrón de medida no corresponde al nivel de referencia del manómetro. Generalmente se considera en el centro en manómetros analógicos y en los digitales en la conexión de presión. La corrección se realiza de la siguiente manera:

$$P_H = P_T - \rho g h \quad (3.7)$$

Donde:

P_G : Valor de presión corregido por carga hidrostática y por gravedad local (Pa),

P_T : Valor de presión corregido por temperatura y gravedad (Pa),

P_N : Valor nominal de presión (Pa),

g_l : Aceleración de la gravedad local (9.781506 m/s^2).

ρ : Densidad del fluido utilizado por el patrón para generar presión (1.161 kg/m^3)

h : Diferencia de niveles de referencia (m)

Corrección por empuje del aire

Esta corrección se realiza a las lecturas, cuando se utilizan masas de diferente valor y se considera la densidad del aire (temperatura, humedad y presión atmosférica) en el

momento de realiza la calibración quedando de la siguiente manera:

$$P_E = P_G \left(\frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}}{1 - \frac{\rho_{an}}{\rho_m}} \right) \quad (3.8)$$

Donde:

$$P_G = P_N \left(\frac{gl}{gs} \right) \quad (3.9)$$

Donde:

P_E : Valor de presión corregido por corrección por empuje del aire (Pa),

P_G : Valor de presión corregido por gravedad (Pa),

ρ_a : Densidad del aire a las condiciones ambientales de la calibración (kg/m³).

ρ_m : Densidad del material de las pesas de la balanza (kg/m³).

ρ_{an} : Densidad del aire a condiciones normalizadas (kg/m³).

Para determinar el cálculo de la densidad del aire se necesita conocer los valores de las lecturas durante el proceso de calibración de: temperatura ambiente, humedad relativa ambiente y presión atmosférica.

Densidad del aire

La fórmula del cálculo de la densidad del aire ambiental de acuerdo a CIMP-2007 [25] es:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (3.10)$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aire ambiental (Kg/m³).

p : Es la presión (Pa).

X_v : Es la fracción molar del vapor de agua.

M_v : Masa molar del vapor de agua (0.01801528 kg/mol).

M_a : Masa molar del aire humedo por mol (0.02896546 kg/mol).

Z : Es el factor de compresibilidad para un gas

R : Constante universal de los gases (8.314472 J/molK).

T : Es la temperatura termodinamica del aire en Kelvin (K).

Fracción molar de vapor de agua.

La ecuación para determinar la fracción molar del vapor de agua es:

$$X_v = hf \frac{P_{sv}}{p} \quad (3.11)$$

Donde:

h : humedad relativa del aire dada en fracción porcentual.

f : factor de corrección.

P_{sv} : Presión de saturación de vapor del aire húmedo (Pa).

p : Presión ambiental (Pa).

Presión de vapor de agua saturada P_{sv} .

P_{sv} se calcula con:

$$P_{sv} = e^{AT^2+BT+C+\frac{D}{T}} \quad (3.12)$$

Donde:

$$A : 1.2378847 \times 10^{-5} (\text{K}^{-2}).$$

$$B : -1.9121316 \times 10^{-2} (\text{K}^{-1}).$$

$$C : 33.93711047.$$

$$D : -6.3431645 \times 10^3 (\text{K}).$$

$$T : \text{Temperatura termodinámica (K)}.$$

Factor de corrección f .

La ecuación es:

$$f = \alpha + \beta p + \gamma T^2 \quad (3.13)$$

Donde:

$$\alpha : 1.00062$$

$$\beta : 3.18 \times 10^{-8} (\text{Pa}^{-1}).$$

$$\gamma : 5.6 \times 10^{-7} (\text{K}^{-2}).$$

$$p : \text{Presión (Pa)}.$$

$$T : \text{Temperatura termodinámica (K)}.$$

Factor de compresibilidad La ecuación es:

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t) X_v + (c_0 + c_1 t) X_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + e X_v^2) \quad (3.14)$$

Donde:

p : *Presión* (Pa).

T : *Temperatura del aire* (K).

t : *Temperatura del aire en Celsius* (°C).

X_v : *Fracción molar de vapor de agua* (°C).

a_0 : 1.58123×10^{-6} (KPa⁻¹).

a_1 : -2.9331×10^{-8} (Pa⁻¹).

a_2 : 1.1043×10^{-10} (K⁻¹Pa⁻¹).

b_0 : 5.707×10^{-6} (KPa⁻¹).

b_1 : -2.051×10^{-8} (Pa⁻¹).

c_0 : 1.9898×10^{-4} (KPa⁻¹).

c_1 : -2.376×10^{-6} (Pa⁻¹).

d : 1.83×10^{-11} (K²Pa⁻²).

e : -0.765×10^{-8} (K²Pa⁻²).

3.5. Sistemas de control

A partir del modelo matemático del sistema, obtenido de las relaciones físicas que describen el comportamiento del conjunto pistón–cilindro y las variables involucradas en la generación de presión, es posible implementar un sistema de control que permita regular la presión de forma automática. Para ello, se emplea un controlador que utiliza la retroalimentación del sistema para ajustar la respuesta de la planta y mantener la variable de interés dentro de los valores deseados [13].

Un sistema puede definirse como una combinación de componentes que interactúan entre sí para cumplir un objetivo determinado. Este concepto no se limita únicamente a sistemas físicos, sino que también puede aplicarse a sistemas biológicos, económicos u otros fenómenos dinámicos [26]. En el caso de un sistema de control, el objetivo es regular el comportamiento de una planta mediante señales de entrada, procesamiento interno y señales de salida que influyen sobre el sistema.

Dependiendo de si el sistema recibe una retroalimentación de la salida o no, los sistemas de control pueden clasificarse en lazo abierto o lazo cerrado, como se muestra en la Figura 3.14 [13]. En general, un sistema de control puede representarse mediante los siguientes bloques funcionales:

- Unidad de control.
- Accionamiento.
- Sensores.
- Interfaces.

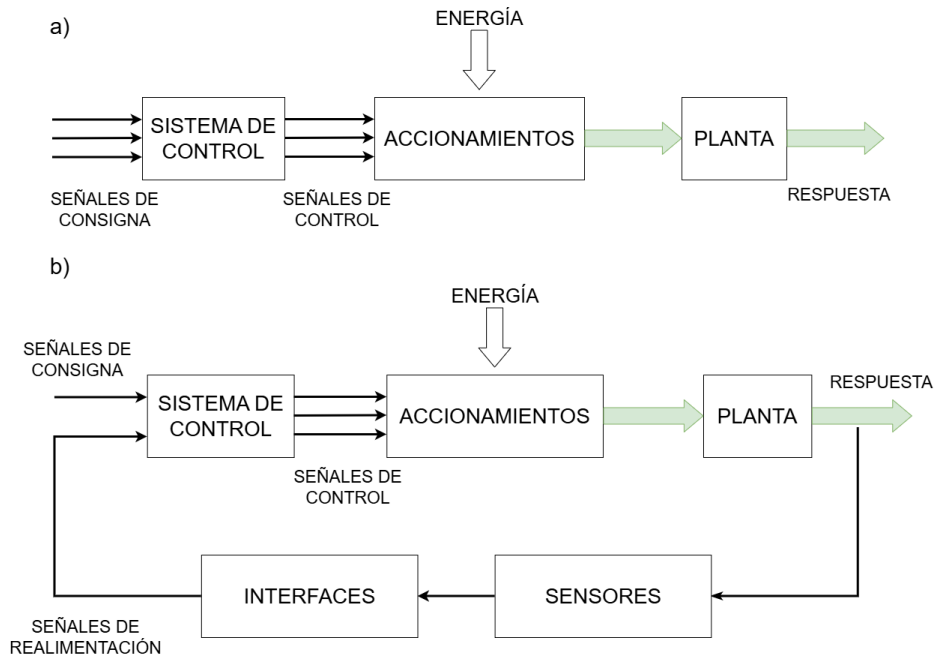


Figura 3.14. a) Sistema de control en lazo abierto. b) Sistema de control en lazo cerrado.

3.5.1. Controlador PI

El controlador Proporcional-Integral (PI), se utiliza para reducir el error en estado estacionario y mejorar la respuesta dinámica [26, 27], su función de transferencia es:

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.15)$$

Tiene:

- Un cero en $s = -\frac{K_i}{K_p}$ si ($K_p \neq 0$)
- Un polo en $s = 0$

Si el cero introducido está cerca del origen y del lado izquierdo del plano s , el PI mejorará el desempeño sin comprometer la estabilidad; sin embargo, si el cero introducido está lejos de los polos dominantes puede provocar sobreimpulso o un incremento del tiempo [26, 27].

3.5.2. Controlador PD

El controlador Proporcional-Derivativo (PD) se utiliza para reducir el tiempo de estabilización y el sobreimpulso; predice el error, lo que genera una acción correctiva antes de que este crezca. Además, mejora la precisión y reduce el error en estado estacionario [26]. Su función de transferencia es:

$$G_s(s) = K_p + K_d s \quad (3.16)$$

Introduce:

- Un cero en $s = -\frac{K_p}{K_d}$ si ($K_d \neq 0$)
- No introduce polos adicionales.

El cero modifica la respuesta transitoria del sistema, lo que puede acelerar la respuesta y reducir el tiempo de estabilización. Sin embargo, en sistemas con un nivel de ruido alto, la ganancia derivativa amplifica el ruido ocasionando inestabilidad [26].

3.5.3. Controlador PID

Un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) integra tanto la parte derivativa e integral, su uso depende de cómo sus polos y ceros afectan la dinámica del sistema, la estabilidad, la rapidez de la respuesta y la eliminación del error en estado estacionario. La función de transferencia del controlador PID en el dominio de Laplace puede expresarse como [26]:

$$G_s(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (3.17)$$

Introduce:

- Un cero en el origen $s = 0$.
- Dos ceros que pueden ser reales distintos, iguales o complejos conjugados debido a la expresión $K_p s + K_d s^2$.
- Un polo en el origen.

La ubicación de los polos en sistemas con PID implica varios cambios. Los polos más a la izquierda significan una respuesta más rápida; los polos en el eje real mejoran el amortiguamiento, pero los polos complejos cerca del eje imaginario generan oscilaciones. Los ceros reales pueden ayudar a eliminar polos o cambios en la respuesta transitoria.

La parte problemática en este tipo de controlador es la sincronización de los parámetros y los valores de las constantes. Además, en sistemas altamente ruidosos o con retardos grandes se puede considerar usar otra variante como PI o PD.

Los sistemas de control PD, PI y PID se basan en el comportamiento dinámico o estático del sistema para optimizar su eficiencia. Dicho proceso se describe mediante un modelo matemático que enlaza las variables relevantes, el diseño del control y predice su desempeño bajo ciertas consideraciones de operación.

Capítulo 4

Diseño y simulación del modelo
matemático

El diseño y la simulación de modelos numéricos nos permiten realizar una traducción de los conceptos teóricos a prácticos. Esto permite evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones y ajustar los valores antes de realizar la implementación. En este capítulo se desarrolla un modelo matemático del sistema combinando las relaciones físicas descritas anteriormente. Además, se realizan experimentos para evaluar el rendimiento del modelo y determinar los parámetros adecuados para la implementación efectiva del sistema de control.

Para el diseño del modelo matemático se utilizan principios y ecuaciones descritos en el Capítulo 3. Además, se consideran ciertas consideraciones que permiten simplificar el análisis del sistema. Dichas consideraciones se establecen a partir del procedimiento de calibración mostrado en la Figura 3.1 y se describen a continuación:

- Del diagrama de flujo del proceso de calibración (Figura 3.1), se observa que el sistema realiza ajustes sucesivos de presión hasta alcanzar el valor deseado. Cuando esta condición se cumple, el sistema entra en un estado de equilibrio. Por lo tanto, el análisis matemático se realiza considerando el comportamiento del sistema en esta condición de operación.
- Debido a que la colocación y retiro de las masas durante el proceso de calibración se realiza de manera manual, los valores de las masas utilizadas se consideran constantes durante cada punto de calibración.
- De acuerdo con el principio de incertidumbre descrito en [8], si las variaciones de temperatura, humedad relativa y presión barométrica son pequeñas durante el proceso de calibración, las correcciones asociadas al empuje del aire, gravedad local y dilatación térmica presentan cambios mínimos. Por esta razón, dichas correcciones se calculan al inicio del proceso y se consideran constantes durante el análisis.
- La corrección hidrostática se considera despreciable, ya que durante la instalación de los equipos se procura que el instrumento bajo calibración (IBC) y el patrón se encuentren a la misma altura.

- El ensamble cilindro–pistón no se cambia durante el proceso de calibración. Por lo tanto, la densidad del material y el área efectiva del pistón, se consideran constantes.

Definidas las constantes del sistema y la variable de entrada, se establece que la variable de salida del modelo corresponde a la posición del ensamble cilindro–pistón. Esta posición representa el punto de flotabilidad o equilibrio del sistema, el cual se alcanza cuando la fuerza generada por la presión aplicada equilibra la fuerza ejercida por las masas sobre el pistón.

4.1. Modelo matemático

Utilizando (3.3), (3.4),(3.6), (3.10) y definiendo que la señal de entrada es p y la señal de salida es y , tenemos que la ecuación del sistema es:

$$m\ddot{y} = -mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) + A_o(1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr))p \quad (4.1)$$

Considerando:

$$\begin{aligned} x_1 = y &\longrightarrow \dot{x}_1 = \dot{y} = x_2 \\ x_2 = \dot{y} &\longrightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Al sustituir se obtiene el modelo en espacio de estados, el cual es:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.3)$$

$$\dot{x}_2 = -g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) + (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m}\right) p \quad (4.4)$$

El modelo descrito anteriormente es no lineal, debido al término constante $-g(1 - \rho_a/\rho_m)$. Para el diseño de observadores y controladores lineales es necesario un sistema lineal y homogéneo. Para ello se calcula el punto de equilibrio \hat{x}_2 y \hat{p} igualando a cero los valores de \dot{x}_1 y \dot{x}_2 , obteniendo:

$$x_2 = 0 \quad (4.5)$$

$$\hat{p} = \frac{g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)}{(1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m}\right)} \quad (4.6)$$

4.1.1. Variables de error

Teniendo el modelo de la planta, se calculan las variables de error considerando que:

$$z_1 = x_1 - \hat{x}_1 \quad (4.7)$$

$$z_2 = x_2 - \hat{x}_2 \quad (4.8)$$

$$w = p - \hat{p} \quad (4.9)$$

Derivando z_1 :

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 = x_2 \quad (4.10)$$

Se sustituye el valor de x_2 y se obtiene:

$$\dot{z}_1 = z_2 + \hat{x}_2 \quad (4.11)$$

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (4.12)$$

Derivando z_2

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 = -g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) p \quad (4.13)$$

Al sustituir el valor de p se obtiene:

$$\dot{z}_2 = -g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) (w + \hat{p}) \quad (4.14)$$

Al sustituir \hat{p} da:

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = -g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) + (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) w + \\ (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) \left(\frac{g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)}{(1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right)} \right) \end{aligned}$$

Simplificando:

$$\dot{z}_2 = (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) w \quad (4.15)$$

De este modo, al reescribir las ecuaciones en función de (z_1, z_2) , queda un sistema lineal homogéneo:

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (4.16)$$

$$\dot{z}_2 = (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) w \quad (4.17)$$

4.1.2. Función de transferencia

Para encontrar la función de transferencia se procede a aplicar la transformada de Laplace a las variables de estado (4.16)- (4.17) lo que da:

$$sZ_1(s) = Z_2(s) \quad (4.18)$$

$$sZ_2(s) = (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) W(s) \quad (4.19)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones simultáneas se obtiene la función de transferencia, la cual es:

$$G(s) = \frac{Z_1(s)}{W(s)} = \frac{(1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right)}{s^2} \quad (4.20)$$

Para simplificar, se realiza un cambio de variable donde:

$$a = (1 + \alpha_{c-p}(Tp - Tr)) \left(\frac{A_o}{m} \right) \quad (4.21)$$

Quedando la función de transferencia como:

$$G(s) = \frac{a}{s^2} \quad (4.22)$$

El sistema tiene dos polos en el origen lo que provoca que la salida crezca de manera cuadrática, debido a que el sistema actúa como un acumulador lo que provoca inestabilidad en el tiempo. Otra condición que presenta es la ausencia de ceros, lo que significa que no hay cancelación de ningún término de entrada.

Por estas características del sistema es necesario implementar un controlador que reubique los polos mediante retroalimentación. A continuación, se describe la implementación de tres controladores: PD, PI y PID.

4.2. Implementación de controlador

Con el modelo de la planta definido por $G(s) = a/s^2$, se implementaron tres estrategias de control en lazo cerrado: PD, PI y PID [26]. Para cada controlador se diseñó un diagrama de bloques con retroalimentación, donde los parámetros se obtuvieron mediante pruebas sucesivas para optimizar el rendimiento bajo condiciones reales simuladas.

Antes de implementar los controladores, se integra la dinámica del actuador al modelo. El actuador neumático que regula la presión tiene un comportamiento de primer orden definido en la siguiente función de transferencia:

$$G_{act}(s) = \frac{1}{t_f s + 1} \quad (4.23)$$

Donde t_f representa el retraso del actuador. Esta función se coloca en cascada en la planta, modificando la función de transferencia total del sistema de la siguiente manera:

$$G_{total}(s) = \frac{a}{s^2(t_f s + 1)} \quad (4.24)$$

Por lo que el controlador se conecta en la retroalimentación del lazo cerrado del sistema propuesto.

4.2.1. Controlador PD

El controlador PD implementa una ganancia proporcional, que incrementa el error presente con un valor derivativo que reduce el sobreimpulso. Para la implementación se añadió un filtro al término derivativo para reducir el ruido, de modo que su función queda:

$$C_{PD}(s) = K_p + K_d \left(\frac{N s}{s + N} \right) \quad (4.25)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_d la ganancia derivativa y N la frecuencia de corte del filtro.

Diagrama de bloques

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema. Se compone de la comparación entre la señal de presión a calibrar (p) y la presión en el punto de equilibrio

(\hat{p}), el bloque del controlador PD, la planta del sistema a/s^2 y el lazo de realimentación unitaria.

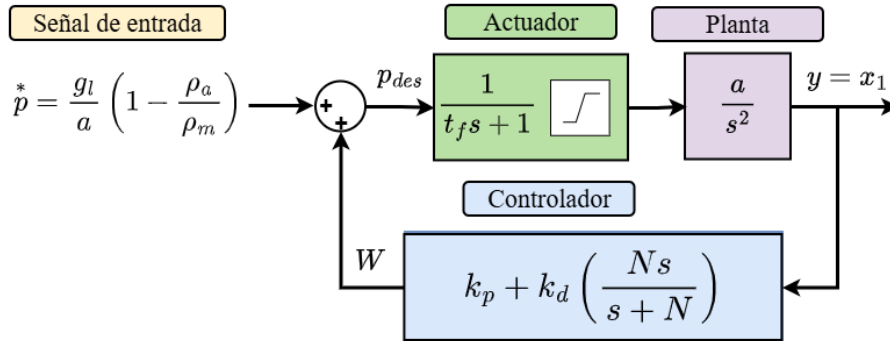


Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PD.

Al implementar el controlador PD en la planta, el sistema deja de ser de lazo abierto para convertirse en un sistema de lazo cerrado, del cual es necesario determinar la función de transferencia de la nueva planta.

Función de transferencia en lazo cerrado

Considerando que:

$$G(s) = \frac{a}{s^2(t_f s + 1)}, \quad C_{PD}(s) = \frac{K_p(s + N) + K_d N s}{s + N}, \quad (4.26)$$

La función de transferencia de lazo cerrado implementando el controlador PD $T_{PD}(s)$ es:

$$T_{PD}(s) = \frac{C_{PD}(s)G(s)}{1 + C_{PD}(s)G(s)} \quad (4.27)$$

$$T_{PD}(s) = \frac{a(s + N)}{s^2(t_f s + 1)(s + N) - a(K_p(s + N) - aK_d N s)} \quad (4.28)$$

Para determinar a , se realizó el cálculo de la media de un conjunto de valores de a , obtenidos mediante la variación de los componentes que lo conforman (el área efectiva, la densidad del aire, la densidad del material y la temperatura).

Para elegir K_p , K_d y N en primera instancia se empleó la herramienta PID Tuner de Simulink para generar una estimación de los parámetros. Esta herramienta calcula

automáticamente los parámetros del controlador a partir del modelo dinámico de la planta, utilizando métodos de sintonización, posteriormente se refinaron mediante múltiples simulaciones que variaban cada parámetro. Estos valores aparecen en la Tabla 4.1 y se utilizaron en las gráficas de polos y ceros del controlador PD.

Tabla 4.1. Parámetros del controlador PD y de la planta.

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
K_p	Ganancia proporcional	-1908648.8	-
K_d	Ganancia derivativa	-2833927.23	s
N	Frecuencia de corte del filtro	2931.4199	rad/s
t_f	Tiempo de retardo del actuador	0.8	s
a	Constante de la planta (a/s^2)	4.729×10^{-5}	m/(kg·s ²)

Con los valores de la Tabla 4.1, la función de transferencia en lazo cerrado da:

$$T_{PD}(s) = \frac{4.729 \times 10^{-5}s + 0.1386268471}{0.8s^4 + 2346s^3 + 2931s^2 + 3.929 \times 10^5s + 2.646 \times 10^5} \quad (4.29)$$

Diagrama de polos y ceros

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de polos y ceros que corresponde a la función de transferencia del controlador PD; en ella se observan:

- Cuatro polos que se encuentran sobre el segundo y tercer cuadrante, parte real negativa ($P_1 = -2931.5 + 0.0000i$, $P_2 = -0.0003 + 0.0129i$, $P_3 = -0.0003 - 0.0129i$ y $P_4 = -0.0007 + 0.0000i$). Indicando que el sistema es asintóticamente estable y tiene componentes oscilatorios debido a la presencia de una parte imaginaria .
- Un cero, el cual se encuentra en la parte real negativa ($z_1 = -2931.4$), pero al estar muy cercano del polo P_1 , provoca un efecto de cancelación parcial entre ambos, generando una dinámica lenta en el sistema.

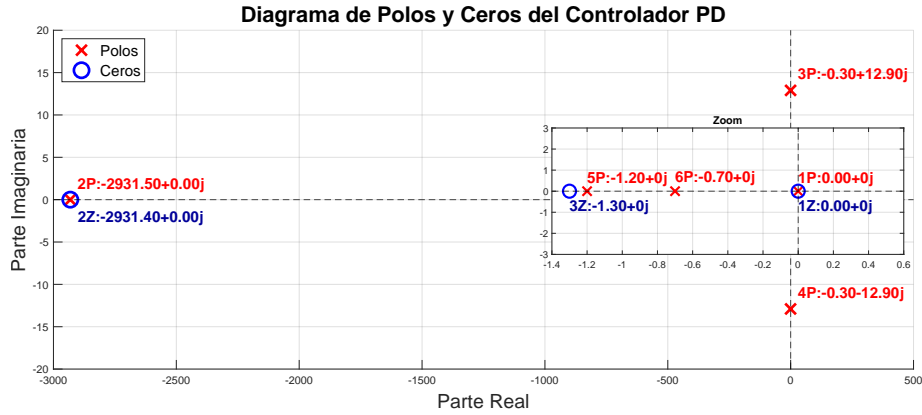


Figura 4.2. Diagrama de Polos y Ceros del Controlador PD.

4.2.2. Controlador PI

El controlador PI introduce un término integral que elimina el error estacionario y un término proporcional que mejora la respuesta transitoria:

$$C_{PI}(s) = K_p + K_i \left(\frac{1}{s} \right) \quad (4.30)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral.

Diagrama de bloques

En la Figura 4.3, se muestra el diagrama de bloques con el controlador PI. Se compone de la señal de desviación $(\dot{p} + W)$, el actuador, la planta del sistema y el lazo de realimentación con el bloque del controlador PI.

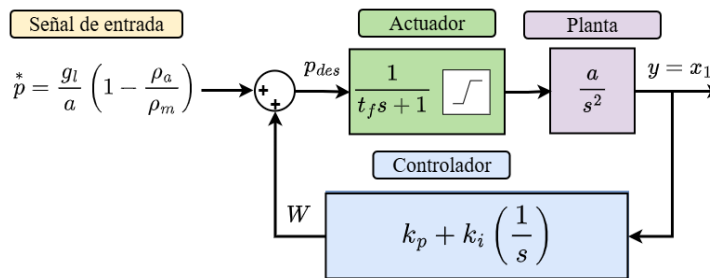


Figura 4.3. Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PI.

Al implementar el controlador PI en la planta, el sistema deja de ser de lazo abierto para convertirse en un sistema en lazo cerrado, del cual es necesario determinar la función

de transferencia de la nueva planta.

Función de transferencia en lazo cerrado

Considerando las funciones de transferencia de la planta, el actuador y el controlador PI, mostradas en (4.22), (4.23) y (4.30) respectivamente, la función de transferencia de lazo cerrado queda como:

$$T_{PI}(s) = \frac{C_{PI}(s)G(s)}{1 + C_{PI}(s)G(s)} \quad (4.31)$$

$$T_{PI}(s) = \frac{as}{t_f s^4 + s^3 - aK_p s - aK_i} \quad (4.32)$$

Para elegir K_p y K_i en primera instancia, se empleó la herramienta PID Tuner de Simulink para generar una estimación de los parámetros, afinando los valores mediante múltiples simulaciones que variaban cada parámetro. Estos valores obtenidos son:

$$K_p = -1908648.80181632 \quad (4.33)$$

$$K_i = -285617.178574872 \quad (4.34)$$

Con los valores calculados y utilizando la misma a y t_f que el controlador anterior, la función de transferencia en lazo cerrado es:

$$T_{PI}(s) = \frac{4.729 \times 10^5 s}{0.8s^4 + s^3 + s + 90.26s + 13.51} \quad (4.35)$$

Diagrama de polos y ceros

En la Figura 4.4 se muestra el diagrama de polos y ceros que corresponde a la función de transferencia del controlador PI; en él se observan:

- Un único cero en el origen, lo que ocasiona que tenga un comportamiento integrador.
- Cuatro polos, un polo en -5.24 y otro en -0.15 , y dos complejos conjugados en $2.07 \pm 4.15j$, los cuales, al estar en el semiplano derecho, indican inestabilidad y la respuesta oscila de manera creciente.

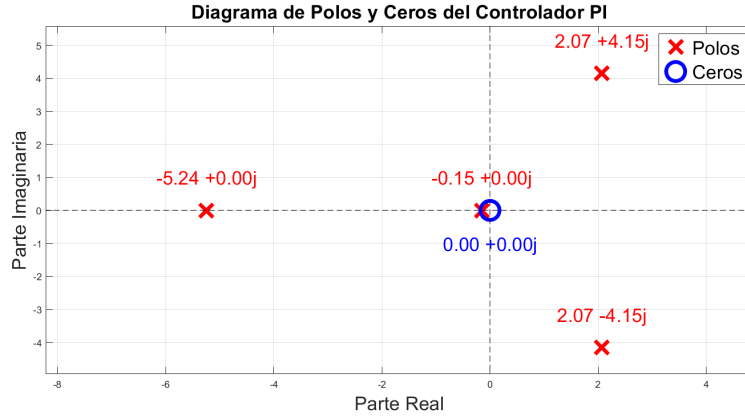


Figura 4.4. Diagrama de Polos y Ceros del Controlador PI.

Por las propiedades que presenta el sistema se determina que el controlador PI no es útil, debido a que su implementación genera polos complejos inestables, lo que se traduce en que el sistema sea más inestable.

4.2.3. Controlador PID

El controlador PID es la combinación de los otros dos controladores; implementa una ganancia proporcional, una ganancia integral y una ganancia derivativa. de igual manera, se implementó un filtro al término derivativo, de modo que su función queda:

$$C_{PID}(s) = K_p + K_i \left(\frac{1}{s} \right) + K_d \left(\frac{Ns}{s + N} \right) \quad (4.36)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral, K_d la ganancia derivativa y N la frecuencia de corte del filtro.

Diagrama de bloques

En la Figura 4.5, se muestra el diagrama de bloques con el controlador PID. Como los anteriores, se compone de la señal de desviación, la planta del sistema a/s^2 , el lazo de realimentación unitaria y cambiando solo el bloque del controlador PID .

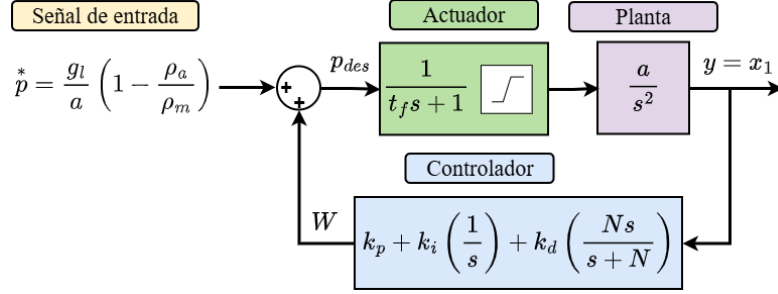


Figura 4.5. Diagrama de bloques del sistema utilizando controlador PID.

Al implementar el controlador PID en la planta, se crea un nuevo sistema en lazo cerrado del cual es necesario determinar la función de transferencia.

Función de transferencia en lazo cerrado

Considerando las funciones de transferencia de la planta (4.22), el actuador (4.23) y el controlador PID (4.36), la función de transferencia de lazo cerrado queda como:

$$T_{PID}(s) = \frac{C_{PID}(s)G(s)}{1 + C_{PID}(s)G(s)} \quad (4.37)$$

$$T_{PID}(s) = \frac{as(s+N)}{s^3(t_f s + 1)(s+N) - a(K_p s(s+N) + K_i(s+N) + K_d N s(t_f s + 1))} \quad (4.38)$$

Para elegir K_p , K_i y N en primera instancia, se empleó la herramienta PID Tuner de Simulink para generar una estimación de los parámetros, afinando los valores a través de múltiples simulaciones que variaban cada parámetro. Estos valores son los mostrados en la Tabla 4.1 y utilizando las mismas a , k_i y t_f que los controladores anteriores, la función de transferencia en lazo cerrado da:

$$T_{PID}(s) = \frac{4.729 \times 10^{-5} s^2 + 0.1386 s}{0.2 s^5 + 587.3 s^4 + 2931 s^3 + 8009 s^2 + 3.042 \times 10^5 s + 3.959 \times 10^4} \quad (4.39)$$

Diagrama de polos y ceros

En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de polos y ceros correspondiente a la función de transferencia del controlador PID. En este diagrama se pueden observar las siguientes características:

- cuatro ceros reales ubicados uno en -1.25 y tres en el origen. La presencia de estos ceros influye en la forma de la respuesta transitoria del sistema, contribuyendo a mejorar la rapidez de respuesta y reduciendo parcialmente los efectos de algunos polos cercanos.
- Seis polos en el sistema: tres polos reales negativos localizados en -1.25 , -0.45 y -0.22 , un par de polos complejos conjugados en $s = -0.26 \pm 12.92j$, y un polo en el origen. El par de polos complejos introduce una componente oscilatoria en la respuesta del sistema. No obstante, al encontrarse la parte real de todos los polos en el semiplano izquierdo, el sistema presenta un comportamiento estable.

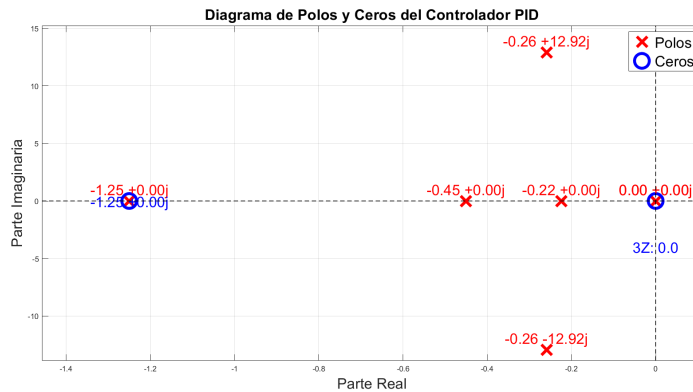


Figura 4.6. Diagrama de polos y ceros del Controlador PID.

La implementación del controlador PID desplaza los polos de la planta original hacia el semiplano negativo, garantizando la estabilidad.

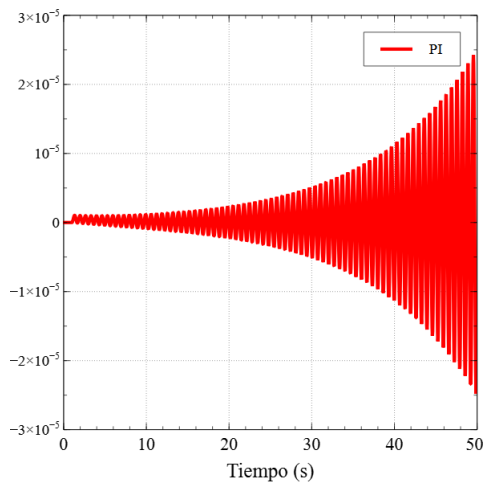
4.2.4. Comparación y selección del controlador

Para realizar la comparación de manera adecuada entre los controladores, se analizaron sus respuestas al escalón unitario.

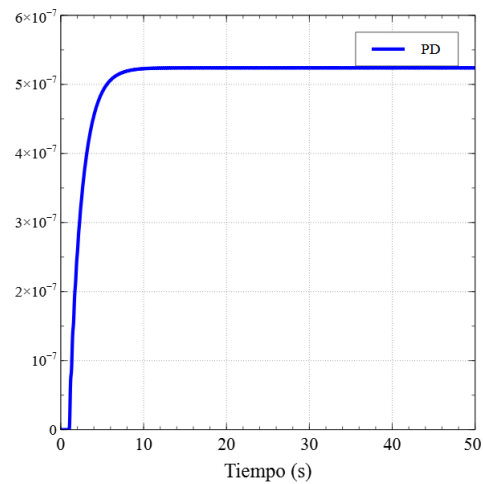
En la Figura 4.7a se muestra la respuesta del controlador PI. Como se puede observar, dicho controlador resulta ser inestable, presentando oscilaciones crecientes debido a polos en el semiplano derecho. La planta, con dos polos en el origen, es inherentemente inestable y el término integral del PI añade un polo adicional en el origen. Esto provoca que,

aunque un cero con parte real negativa desplace uno de los polos hacia la región estable, los otros dos polos se ubiquen en el semiplano inestable generando oscilaciones crecientes. Para mejorar su desempeño, el controlador PI puede combinarse con técnicas que añadan amortiguamiento como en un controlador PID o emplear controladores más avanzados.

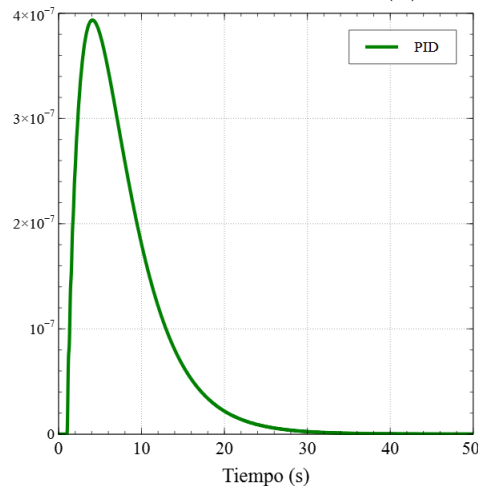
En la Figura 4.7b se presenta la respuesta del controlador PD, en ella se observa que el controlador PD logra estabilizar la planta y eliminar el error en estado permanente, sufriendo el punto de equilibrio un desplazamiento. En la Figura 4.7c se aprecia la respuesta del controlador PID a una señal escalón unitario, donde se observa que dicho controlador es estable, elimina el error y el punto de equilibrio no presenta desplazamiento.



(a) Con controlador PI.



(b) Con controlador PD.



(c) Con controlador PID.

Figura 4.7. Respuestas del sistema al escalón unitario utilizando los controladores PI, PD y PID.

Además de las respuestas de los controladores al escalón unitario, se emplearon cuatro métricas estándar de desempeño para evaluar su comportamiento dinámico. Estas métricas son: Tiempo de subida (t_r), el sobreimpulso máximo (M_p), el tiempo de establecimiento (t_s) y el error en régimen permanente (e_{ss}).

El tiempo de subida se define como el tiempo que tarda la respuesta del sistema en pasar del 10 % al 90 % del valor final. El tiempo de establecimiento corresponde al tiempo que tarda la respuesta en permanecer dentro de una banda del $\pm 2\%$ alrededor del valor en estado estacionario.

Los resultados del desempeño se muestran en la Tabla 4.2

Tabla 4.2. Comparación de métricas de desempeño.

Controlador	$t_r(s)$	$M_p(\%)$	$t_s(s)$	e_{ss}
PD	2.97	5.2	0.25	0
PID	0.89	40	4.1	0
PI	0.95	100	∞	N/A

De la Tabla 4.2 se puede observar que el controlador PID presenta el menor tiempo de subida (0.89 s), seguido del controlador PI (0.95 s). El controlador PD presenta un tiempo de subida mayor (2.97 s). Sin embargo, el controlador PD presenta un sobreimpulso menor en comparación con el controlador PID.

Tanto el PD como el PID logran estabilizar la planta y eliminar el error en estado permanente. Sin embargo, el controlador PID es el único que permite mantener el punto de equilibrio del sistema en su posición original, manteniendo una salida constante sin desplazamiento del equilibrio.

Capítulo 5

Implementación del sistema de
calibración

Para realizar la implementación del sistema propuesto de automatización del proceso de calibración de equipos manométricos, a partir del modelo matemático del sistema de control descrito en el capítulo anterior, es necesaria una configuración del entorno de hardware y software, así como la integración de los diferentes módulos que trabajan en el sistema.

Dicha implementación se realizó sobre una Raspberry Pi 4 como controlador central, permitiendo la comunicación con los equipos de medición, la adquisición de datos, la recopilación del proceso de calibración y la ejecución del control.

5.1. Controlador central

La implementación del control central del sistema de calibración se realizó mediante una Raspberry Pi 4, debido a su capacidad de procesamiento, compatibilidad con sistemas operativos de licencia libre y disponibilidad de diferentes protocolos e interfaces de comunicación. Este dispositivo permite integrar todos los módulos de comunicación, adquisición, control y almacenamiento de una manera eficiente.

La Raspberry Pi 4, al fungir como núcleo del sistema, se encarga de ejecutar los siguientes procesos:

- Ejecutar el control a la regulación de presión para el proceso de calibración.
- Gestionar la comunicación con los dispositivos de calibración mediante las interfaces de GPIB y serial.
- Administrar el acceso a la base de datos, tanto para la consulta de los parámetros fijos como para el registro de los resultados del proceso de calibración.

Entre las principales ventajas se encuentran su código abierto, la aplicación de diferentes lenguajes y software de programación y la instalación de librerías especializadas como PyVISA, PySerial, PyGPIB, etc., así como su tamaño compacto y fácil colocación, propiedades importantes para un sistema de automatización.

El sistema operativo permite la comunicación entre los componentes físicos del proceso (equipos, cables, sensores, memoria, etc.) y las aplicaciones desarrolladas para el sistema

de calibración; es decir, es responsable de gestionar los recursos, ejecutar los procesos repetitivos, controlar los dispositivos y almacenar la información.

Para evitar errores en el sistema o incompatibilidades con los diferentes equipos utilizados, se instala un sistema operativo basado en linux de 32 bits sobre la Raspberry Pi 4. Este entorno permite una base estable para ejecutar el software desarrollado en Python, así como la integración de librerías dedicadas a la comunicación con instrumentos de medición y la gestión de bases de datos. Aunque es un sistema de código abierto, permite implementar configuraciones específicas para los equipos de medición, esto trae consigo una desventaja importante: la continua actualización de componentes críticos del sistema operativo.

Uno de esos componentes críticos del sistema operativo es el kernel, debido a que se encarga directamente de la comunicación con el componente físico (hardware) y de la administración de los controladores de dispositivos. Por ello, en el sistema propuesto, el kernel es fundamental para el correcto reconocimiento y operación del adaptador GPIB-USB y del puerto de comunicación serial utilizados para interactuar con los equipos de medición.

La configuración del kernel 6.1.21-v7+ garantiza la carga de los módulos de comunicación necesarios para los instrumentos, ya que evita problemas en la detección de dispositivos, interrupciones o latencias elevadas en la comunicación, así como la estabilidad del sistema durante la adquisición de datos.

Por estas razones, la selección y configuración del sistema operativo y el kernel se enfocan en garantizar un entorno continuo, estable y compatible con los controladores de los equipos, el lenguaje, las librerías y los comandos de Python.

5.2. Diseño e implementación de la base de datos

Para la gestión, almacenamiento y trazabilidad de la información obtenida durante el proceso de calibración, se implementa una base de datos mediante el gestor MariaDB. El empleo de una base de datos relacional facilita la consulta y el análisis tanto de los valores de referencia, como de los obtenidos en el proceso de calibración, lo que permite distinguir

los valores constantes de aquellos que son resultado de cada ejecución del sistema.

La base de datos diseñada, sigue un modelo relacional dirigido a garantizar la trazabilidad del proceso de calibración. Su estructura se divide en dos grupos de tablas: tablas de catálogo y tablas operativas. Las primeras almacenan la información de referencia utilizada durante la configuración, mientras que las segundas registran los datos generados en cada servicio de calibración.

En la Figura 5.1 se presenta el diagrama Entidad-Relación de la base de datos empleada en el sistema, el cual muestra la organización de las entidades (tablas) y las relaciones establecidas entre ellas. En dicho esquema, la tabla *CAL_SERVICIO* representa el inicio de cada servicio de calibración, donde se registra la información de entrada del IBC, el folio, el expediente, la fecha de inicio y la configuración general del proceso.

A partir de la tabla anterior se relaciona la tabla *CAL_PRUEBA*, ya que representa las pruebas realizadas en cada punto de presión, incluyendo los valores de control utilizados para la regulación del sistema. Cada prueba genera múltiples registros de medición, que son almacenados en la tabla *CAL_MUESTRA*. Esta registra los valores obtenidos durante el tiempo de medición, tales como presión, condiciones ambientales, masa aplicada y punto de equilibrio, permitiendo documentar el comportamiento del sistema durante todo el proceso de calibración.

Las tablas *MASA* y *PISTON* almacenan los parámetros físicos del juego de pesas y del pistón respectivamente. Estos datos corresponden a valores verificados y certificados, lo que permite que los resultados obtenidos sean consistentes y confiables.

Debido a que en el proceso de calibración la selección de masas se realiza de manera específica para cada prueba, se utiliza una tabla intermedia (*CAL_PRUEBA_MASA*) entre *CAL_PRUEBA* y *MASA*. Esta relación permite asociar de manera directa las masas aplicadas en cada punto de calibración, mejorando la trazabilidad del proceso.

Finalmente, se integran tablas de catálogo como *CAT_UNIDAD*, *CAT_PISTON* y *CAT_TIPO_BALANZA*, las cuales permiten normalizar configuraciones recurrentes, evitando la redundancia de información y asegurando la coherencia en los datos.

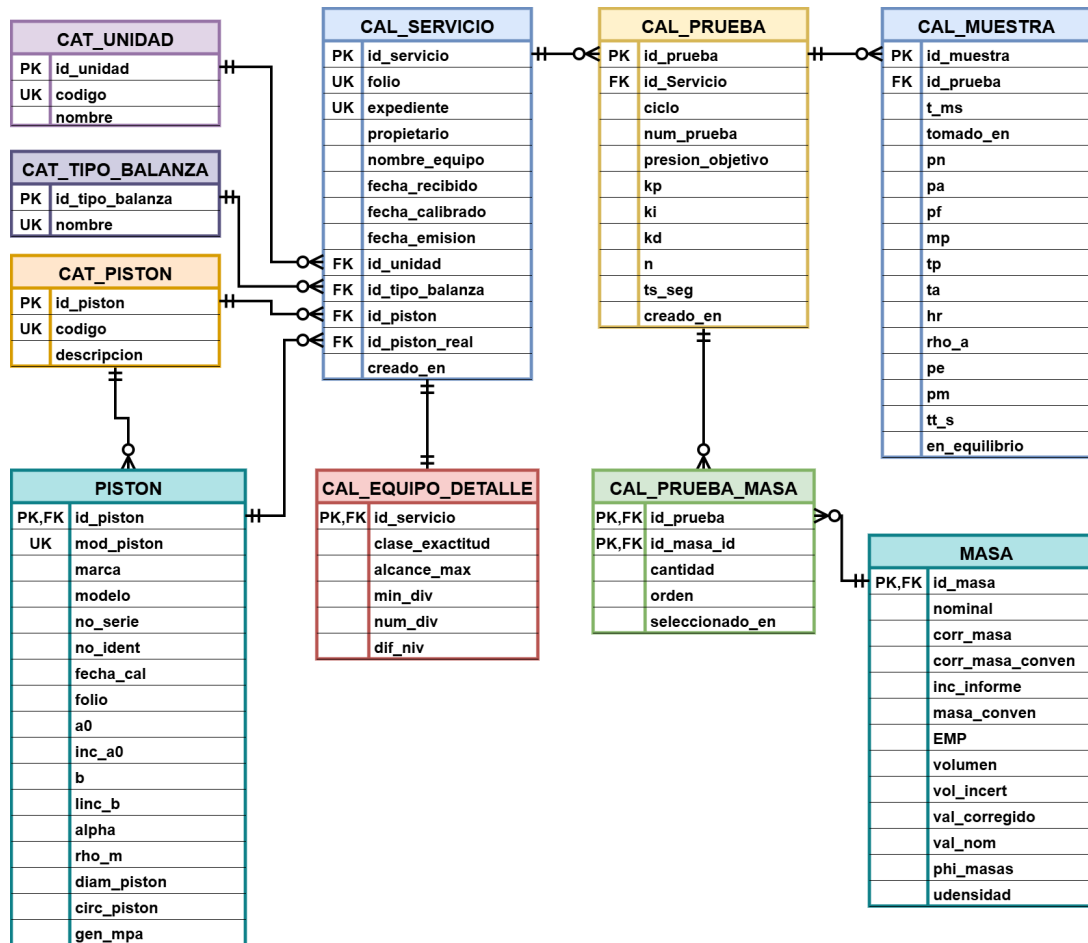


Figura 5.1. Diagrama Entidad-Relación de la base de datos utilizada en el sistema.

El diseño de la base de datos proporciona el soporte fundamental para la gestión de la información del sistema de calibración, permitiendo la consulta de información de referencia y el almacenamiento automático de los resultados obtenidos.

5.3. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario

La implementación de una interfaz gráfica desarrollada con PyQt Designer cuya lógica fue diseñada en Python, permite al usuario interactuar con el sistema de automatización propuesto. La interfaz funge como intermediaria entre los diferentes módulos del sistema como son la adquisición de datos, el control automático, el almacenamiento en base de datos y la supervisión del proceso.

El diseño de la interfaz facilita la secuencia de operaciones del proceso de calibración.

Para ello, la interfaz permite al usuario configurar el servicio que se va a realizar mediante la selección de instrumentos de medición, las unidades y los parámetros de la prueba, así como supervisar las mediciones en tiempo real y almacenar automáticamente los valores obtenidos durante el proceso.

5.3.1. Arquitectura de la interfaz

El programa se estructura de manera modular, donde la interfaz gráfica se divide en la comunicación, la lógica de control y el almacenamiento, permitiendo una configuración clara para el desarrollo y mantenimiento. En la Figura 5.2 se presenta el diagrama de bloques del software del sistema, donde se distingue su estructura modular.

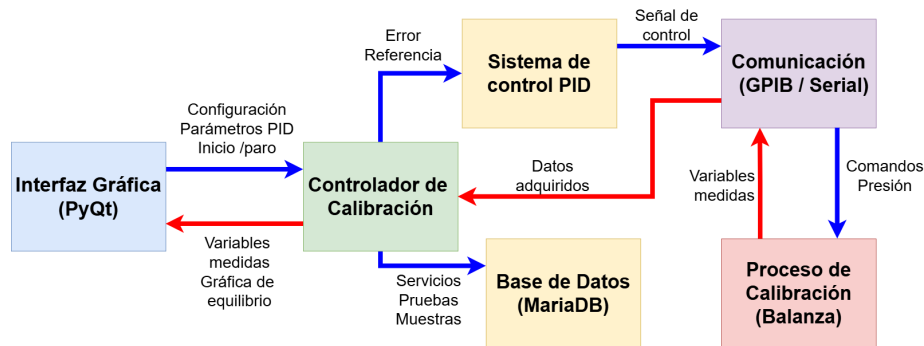


Figura 5.2. Diagrama de bloques del sistema de calibración propuesto.

La ventana principal está determinada por la clase *VentanaPrincipal*, donde se carga el diseño elaborado en Qt Designer y se gestiona la navegación entre las diferentes pantallas del sistema. En esa clase se llaman dos módulos principales:

- *CalibracionControl*, el cual se encarga de la adquisición y el almacenamiento de datos, la implementación del control y los cálculos, así como de la gratificación de los datos obtenidos.
- *ComunicacionControl*, se encarga de la configuración y verificación de la comunicación entre los instrumentos por medio de las interfaces GPIB y serial.

Esto permite que la interfaz gráfica sea un enlace entre el usuario y los diferentes procesos del sistema de calibración.

5.3.2. Organización de pantallas

La interfaz gráfica divide el proceso de calibración en pantallas mediante el uso de contenedores tipo *QstackedWidget*. Dicha división sigue el siguiente flujo de operación:

1. **Pantalla de inicio**, donde se permite acceder a los diferentes módulos del programa.
2. **Comunicación**, donde se selecciona y verifica la comunicación entre los instrumentos de medición.
3. **Calibración**, Se subdivide en tres submódulos para realizar la adquisición, almacenamiento y control. Los submódulos son:
 - a) Registro del servicio de calibración, donde se introducen los datos del instrumento bajo calibración como el folio, expediente, fechas y datos generales.
 - b) Configuración de pruebas, donde se definen las condiciones del muestreo, como los puntos de presión, parámetros del control, unidades y tipo de pistón.
 - c) Ejecución, en el se realiza la adquisición de datos, el control y el monitoreo en tiempo real del punto de equilibrio.

En la Figura 5.3 se muestra la vista general de la interfaz gráfica desarrollada, donde se observa la organización modular de las pantallas y el acceso a las distintas funciones del sistema.



Figura 5.3. Pantalla de inicio de la interfaz gráfica del sistema de calibración.

Esta estructura permite guiar al usuario de forma consecutiva durante el proceso, disminuyendo los errores de configuración.

5.3.3. Componentes de la interfaz

La interfaz se compone de diferentes componentes gráficos que cumplen funciones específicas. Entre los cuales se encuentran:

- Los campos de entrada (*QLineEdit*, *QDateEdit*) permiten capturar la información proveniente del servicio, los parámetros de control y los valores de prueba.
- Los botones de selección (*QRadioButton*) sirven para determinar las unidades de presión, el tipo de presión y el pistón a utilizar.
- Las listas desplegables (*QComboBox*) permiten determinar el puerto de la interfaz de comunicación GPIB y serial.
- Las etiquetas visuales (*QLabel*) muestran los valores de las variables medidas, como la presión, la masa aplicada, las temperaturas ambiental y de pistón, la humedad relativa y el punto de equilibrio. Los botones (*QPushButton*) que permiten iniciar, cancelar y avanzar entre las diferentes pantallas del sistema.

En la Figura 5.4 se presenta la pantalla de configuración del servicio de calibración, donde el operador introduce los datos del instrumento bajo calibración y selecciona las unidades, el tipo de presión el pistón empleado y los valores a calibrar.

Con la implementación de estas herramientas gráficas, la interfaz permite el manejo y control de la configuración del proceso, así como una mejor visualización de los valores obtenidos.

Unidades del IBC	Propiedades físicas del IBC	Balanza Patron	Tipo de Presión
<input type="radio"/> kPa <input type="radio"/> psi <input type="radio"/> Pa <input type="radio"/> mbar <input type="radio"/> bar <input type="radio"/> kg/cm ² <input type="radio"/> mm de Hg	Clase de exactitud: 0.01 %E.C Alcance Maximo: 4136.85 kPa Mínima División: 0.01 kPa Número de division: 1 Diferencia de Nivel: 25.6200 cm	<input type="radio"/> Neumática <input type="radio"/> Hidráulica	<input type="radio"/> Manométrica <input type="radio"/> Absoluta
Piston empleado	Presiones a Calibrar		
<input type="radio"/> 200-0815 <input type="radio"/> 200-0260 <input type="radio"/> 200-0212 <input type="radio"/> 500-0885 <input type="radio"/> 500-211A	1: 200 kPa 2: 400 kPa 3: 1000 kPa 4: 1600 kPa 5: 2000 kPa	6: 2400 kPa 7: 2800 kPa 8: 3200 kPa 9: 3600 kPa 10: 4000 kPa	<input type="button" value="ANTERIOR"/> <input type="button" value="SIGUIENTE"/>

Figura 5.4. Pantalla de configuración previa al proceso de calibración.

5.3.4. Integración con la base de datos

La interfaz gráfica se integra de manera directa con la base de datos creada en MariaDB, por lo que permite:

- Crear un servicio de calibración.
- Registrar cada prueba relacionada a un punto de presión específico.
- Almacenar en cada muestra las variables de medición y el punto de equilibrio de manera automática.
- Asociar los valores de las propiedades físicas de las masas y del pistón a cada prueba.

Con esta integración de la base de datos con la interfaz, se garantiza la trazabilidad y la repetibilidad del proceso de calibración.

5.3.5. Visualización del punto de equilibrio

Aunque la información almacenada en la base de datos permite consultar los datos en cualquier momento, es necesario visualizar el punto de equilibrio en tiempo real para tener un mejor diagnóstico e interpretación del control propuesto. Para ello, la interfaz integra una gráfica mediante el uso de la biblioteca Matplotlib.

Durante cada prueba, el sistema adquiere constantemente la posición del pistón y la representa en función del tiempo como se observa en la Figura 5.5, lo que permite observar la evolución del sistema hasta alcanzar el punto de equilibrio. Esta gráfica facilita la observación del comportamiento del sistema y ayuda a tomar la mejor decisión durante el proceso.



Figura 5.5. Pantalla de la adquisición de datos y gráfica del punto de equilibrio vs tiempo.

5.3.6. Integración con el sistema de control

Finalmente, la interfaz gráfica conforma la integración entre el sistema de control propuesto y el proceso físico de la calibración, ya que a través de la interfaz se obtienen los valores de medición, como presión, humedad, temperatura y punto de equilibrio, necesarios para que el sistema genere y envíe la señal de control que ajusta la presión generada, logrando así que el sistema alcance el punto de equilibrio.

El punto de equilibrio del pistón representa la variable controlada del sistema, la cual se determina a partir de la posición del pistón medida durante la ejecución de cada prueba. La presión generada se compara con el valor de referencia determinado para el punto de calibración, obteniendo el calculo del error. Partiendo de este error, el sistema de control genera la señal que se envía al generador de presión, actuando de manera directa sobre el

proceso físico.

El proceso de control se ejecuta continuamente en función del tiempo de muestreo definido, integrando la adquisición, el cálculo del error, la evaluación del controlador y la actualización de la señal de error. La interfaz permite definir los parámetros del controlador en cada servicio y supervisar el sistema durante el proceso, obteniendo información directa sobre el funcionamiento del lazo de control.

Además, como se observa en la Figura 5.5, la interfaz representa el comportamiento del punto de equilibrio de manera gráfica, lo que permite supervisar visualmente la estabilidad del sistema y su comportamiento a lo largo del proceso. Esta representación ayuda en la evaluación del comportamiento dinámico del sistema y su comparación con los resultados obtenidos durante la etapa de simulación.

En conjunto, la interfaz gráfica implementada permite la configuración completa del sistema de calibración, la supervisión del control, el almacenamiento de la información y visualizar el comportamiento del sistema. Su diseño secuencial y modular facilita su operación y reduce la posibilidad de cometer errores en el proceso.

5.4. Comunicación del sistema

Para una correcta implementación del sistema de automatización propuesto, se necesita una relación confiable entre el software y los equipos de medición. Esta relación se logra mediante un sistema de comunicación que permite la adquisición de las variables de medición utilizadas en el control, así como el envío de comandos a los equipos utilizados en el proceso.

El sistema de comunicación se integra directamente tanto con la interfaz gráfica como con el sistema de control propuesto, formando así enlaces entre el software (Instrumento virtual propuesto) y el hardware (proceso físico de calibración).

5.4.1. Instrumentos y enlaces de comunicación

El proceso de calibración se conforma por la integración de una variedad de equipos de medición que cumplen roles específicos como la medición de presión, las condiciones

ambientales y el punto de equilibrio, así como la generación de presión. Debido a la gran variedad de equipos de medición empleados, se utilizan dos tipos de enlace de comunicación: la comunicación GPIB y la comunicación serial.

El programa propuesto funge como elemento maestro al establecer y gestionar los enlaces de comunicación con cada equipo, los cuales responden a las solicitudes de lectura o acción enviadas. La elección del tipo de comunicación de cada dispositivo se determina por la compatibilidad del instrumento y su confiabilidad. La Tabla 5.1 contiene los instrumentos empleados en el sistema de calibración y el tipo de enlace de comunicación que utiliza.

Tabla 5.1. Instrumentos del sistema, enlaces de comunicación y función dentro del proceso de calibración.

Instrumento	Variable	Interfaz	Protocolo	Función
Balanza de presión	Punto de equilibrio Temperatura de pistón Presión Masa	GPIB	SCPI	Medición
Barómetro	Presión atmosférica	GPIB	SCPI	Medición
Termohigrómetro	Temperatura Humedad Relativa	Serial	ASCII	Medición
Generador de presión	Presión	GPIB	SCPI	Actuación

5.4.2. Flujo de adquisición de datos y envío de comandos

La implementación de la comunicación se realiza utilizando la librería PyVISA, la cual permite la interacción con instrumentos de medición por medio de protocolos. Dicha comunicación se realiza entre el programa y los instrumentos siguiendo un flujo consecutivo. Primeramente, el sistema verifica que exista una comunicación con los dispositivos seleccionados, como se puede observar en la Figura 5.6.

Posteriormente, realiza las solicitudes de adquisición de datos de los valores medidos durante el proceso.

Con los valores obtenidos se procede a realizar el cálculo del error, la densidad del



Figura 5.6. Pantalla de comunicación implementada en la interfaz gráfica propuesta.

aire y la señal de control, la cual se envía al generador de presión por medio del mismo enlace. Esta secuencia se repite de manera consecutiva durante cada prueba, permitiendo el control de lazo cerrado del punto de equilibrio.

Este ciclo de operación permite que los datos intercambiados entre el software y los equipos de medición sean fluidos y relevantes para el proceso de calibración.

5.4.3. Manejo de errores y confiabilidad del sistema

Para garantizar una operación segura y confiable el programa contiene una serie de mecanismos de detección y manejo de errores en la comunicación. Esto permite que el programa notifique la falta de equipos, la pérdida de datos o valores fuera de rango, evitando la propagación de información falsa tanto en los cálculos como en la base de datos.

Esta detección de condiciones anómalas permite interrumpir el proceso en cualquier momento, protegiendo así tanto la integridad de los equipos de medición como la información recopilada.

La implementación del sistema de comunicación crea el enlace entre la parte digital y la parte física del proceso de calibración; por lo tanto, en la siguiente sección se presenta como se realiza la implementación del proceso de calibración de manera física.

5.5. Integración física del sistema

Para que la automatización de la presión en el proceso de calibración se materialice es necesaria una etapa de interconexión entre los instrumentos, el control, las interfaces de comunicación y la interfaz gráfica. Esta integración constituye la relación final entre el software, el control y el proceso físico.

5.5.1. Plataforma central y dispositivos de comunicación

La base central del sistema de control esta conformada por una Raspberry Pi 4, la cual funciona como un nodo principal que ejecuta el software de control, la adquisición de datos y la visualización del proceso. A esta se conectan las interfaces de comunicación por medio de USB de la interfaz de GPIB y serial para establecer el enlace con los instrumentos de medición.

El termohigrómetro se comunica de manera serial por medio de un convertidor USB a serial con conector de 3.5 mm. para el caso del barómetro, balanza y generador, la comunicación se realiza por medio de un adaptador GPIB-USB-HS, el cual permite incorporar múltiples dispositivos por medio de cables GPIB estándar, permitiendo una conexión simultánea entre todos los dispositivos.

5.5.2. Integración del sistema de presión

El sistema de presión se logra mediante la alimentación de gas nitrógeno, que suministra la presión para la operación tanto del generador como de la balanza de presión. Ambos equipos se conectan con el instrumento bajo calibración, permitiendo que la presión controle los tres equipos de manera simultánea durante las pruebas.

Esta estructura establece condiciones de estabilidad y repetibilidad durante el proceso, condiciones necesarias para una calibración confiable y validada.

La integración física del sistema se obtiene al poner en operación los instrumentos y verificar la comunicación en tiempo real con la interfaz. En la Figura 5.7 se observa el sistema físico montado, en específico los instrumentos conectados, las interfaces de comunicación y la plataforma central en operación.

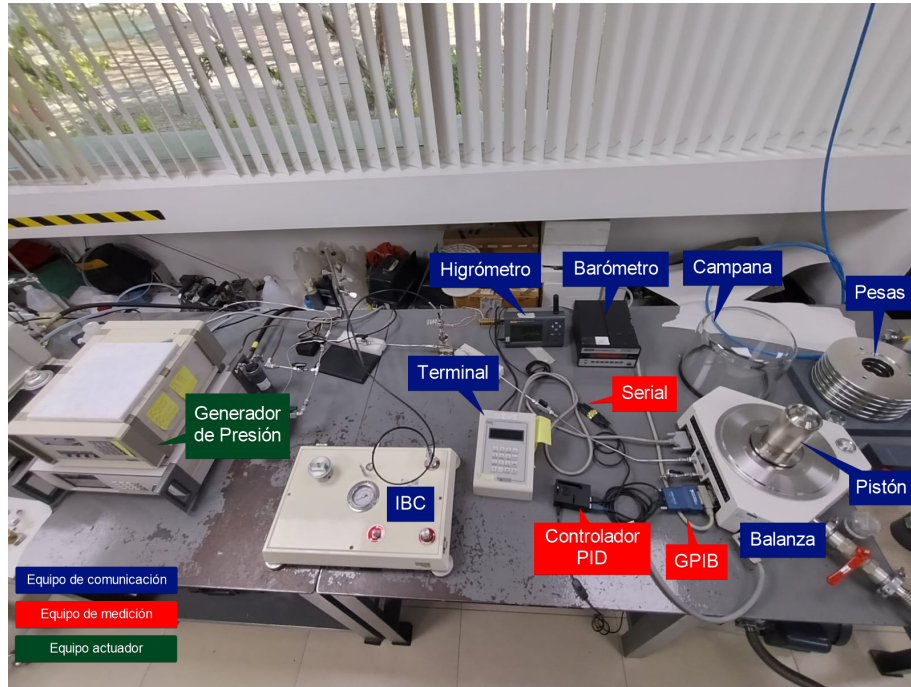


Figura 5.7. Integración física del sistema propuesto.

5.6. Integración del modelo matemático con la implementación experimental

Con la integración física del sistema completada y verificada, se establece la base experimental sobre la cual opera el algoritmo de control desarrollado en este trabajo. Sin embargo, resulta crucial analizar la correlación entre el modelo matemático presentado en el Capítulo 4 y la implementación realizada sobre la plataforma experimental.

5.6.1. Implementación digital del controlador

Aunque el controlador fue diseñado inicialmente en tiempo continuo y considerando un actuador ideal, su implementación práctica incorpora un controlador comercial de presión y una ejecución digital con período de muestreo fijo.

$$T_s = 2 \text{ s} \quad (5.1)$$

Por lo tanto, el controlador continuo:

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \left(\frac{Ns}{s + N} \right)$$

Se implementa mediante su equivalente discreto $C_d(z)$.

En forma discreta, la acción proporcional e integral se expresan como:

$$e[k] = r[k] - z_1[k], \quad (5.2)$$

$$I[k] = I[k - 1] + K_i T_s e[k], \quad (5.3)$$

$$W[k] = K_p e[k] + I[k] + D[k], \quad (5.4)$$

Donde:

$$W[k] \equiv w[k] \equiv \Delta p[k] \quad (5.5)$$

En el modelo continuo el término derivativo se define como:

$$D(s) = K_d \left(\frac{Ns}{s + N} \right) E(s), \quad (5.6)$$

Cuya constante de tiempo asociada es:

$$\tau_d = \frac{1}{N}. \quad (5.7)$$

En la implementación discreta, el término derivativo se calcula mediante un filtro exponencial de primer orden:

$$D[k] = \alpha D[k - 1] + (1 - \alpha) K_d \frac{e[k] - e[k - 1]}{T_s}, \quad (5.8)$$

Donde el parámetro α se relaciona con el parámetro continuo N mediante:

$$\alpha = e^{-NT_s} \quad \Longleftrightarrow \quad N = -\frac{\ln(\alpha)}{T_s}. \quad (5.9)$$

Esta relación garantiza que la constante de tiempo del filtro derivativo discreto sea equivalente a la del modelo continuo.

5.6.2. Lazo cerrado digital

Con estas definiciones el sistema implementado puede expresarse en forma discreta como:

$$Z_1(z) = G_{real}(z) W(z), \quad (5.10)$$

$$W(z) = C_d(z) E(z), \quad (5.11)$$

$$E(z) = R(z) - Z_1(z), \quad (5.12)$$

Manteniendo la misma estructura del lazo cerrado definido en el modelo continuo.

De esta manera, aunque el controlador se ejecuta digitalmente, la correspondencia matemática con el modelo teórico desarrollado en tiempo continuo se conserva mediante la equivalencia entre $C(s)$ y $C_d(z)$.

Sustitución del actuador ideal por el sistema real

En el Capítulo 4 el actuador se representa mediante $G_{act}(s) = 1/(t_f s + 1)$. En la implementación experimental, dicho bloque se sustituye por un controlador comercial, el cual incorpora un lazo interno de regulación de presión. Por lo tanto, la dinámica efectiva entre $W(s)$ y $Z_1(s)$ puede representarse como una planta equivalente:

$$G_{real}(s) = G_{Fluke}(s) G_{neum}(s), \quad (5.13)$$

Manteniendo la misma estructura general del lazo cerrado, pero con un bloque que incluye la dinámica interna del equipo comercial y las no linealidades del sistema neumático.

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la simulación del modelo matemático y de las pruebas experimentales realizadas en el sistema de calibración desarrollado. El objetivo de estos resultados es analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación reales y evaluar el desempeño del sistema de control propuesto.

6.1. Resultados de simulación

Para la obtención de los resultados de simulación, se implementó en Simulink el diagrama de bloques que se aprecia en la Figura 6.1. Dicho modelo se divide en tres niveles principales: cálculo de variables ambientales, determinación de la variable a y la implementación del lazo de control.

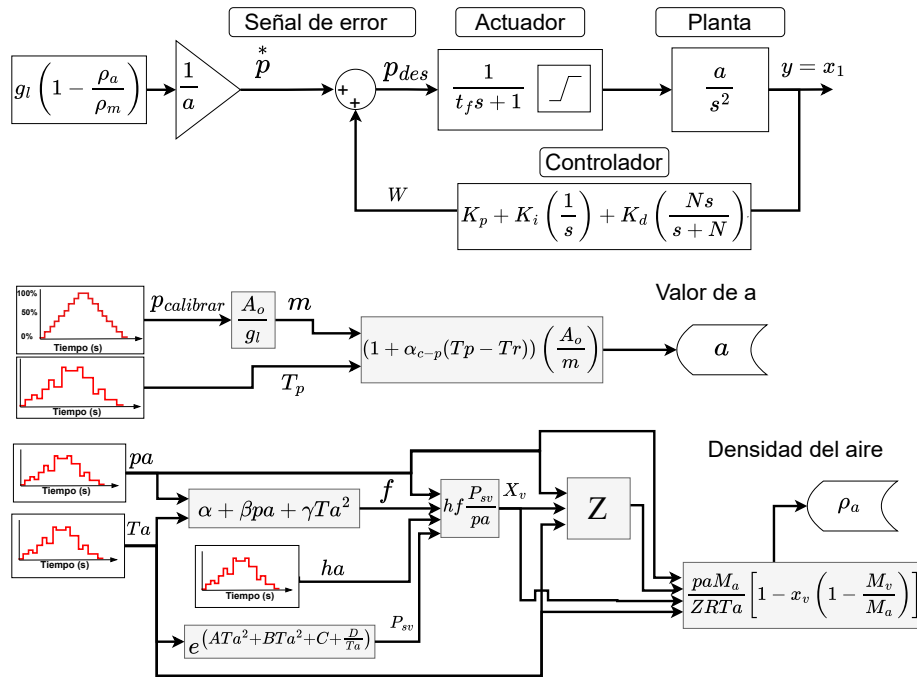


Figura 6.1. Diagrama de bloques del sistema con lazo cerrado con controlador PID con las señales dinámicas cambiantes.

En la parte inferior del diagrama se introducen como señales de entrada las variables de medición: presión atmosférica p_a , temperatura ambiente T_a , humedad relativa h_a , temperatura del pistón T_p y la presión a calibrar. Estas señales ingresan al bloque encargado de determinar la densidad del aire ρ_a , considerando el factor de compresibilidad Z , la fracción

molar de vapor X_v , el factor de corrección f y la presión de vapor de agua saturada P_{sv} .

Posteriormente, la densidad del aire y los parámetros físicos del pistón permiten calcular el valor de a , el cual representa la ganancia de la planta. Dicho parámetro depende de la masa aplicada, el área efectiva del pistón y las correcciones por temperatura.

Con el valor de a calculado, se ingresa en el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado. El lazo se compone de la señal de referencia, la señal de error, el controlador PID, el modelo del actuador mediante una función de primer orden y la planta representada por una de segundo orden.

Para simular un ciclo real de calibración se definen señales dinámicas de entrada que representan las perturbaciones utilizadas en la simulación y se describen a continuación.

6.1.1. Señales de entrada utilizadas en la simulación

Las señales consideradas para representar las variaciones durante un ciclo real de calibración de los parámetros físicos involucrados fueron:

- Presión nominal (p): rampa escalonada ascendente–descendente entre 10 % y 100 % del rango operativo del IBC.
- Temperatura del pistón (T_p): variaciones sincronizadas con los cambios de presión y temperatura ambiente.
- Temperatura ambiente (T_a): cambios correlacionados con el entorno de operación.
- Humedad relativa (h_a): variaciones sincronizadas con el entorno de operación.
- Presión atmosférica (p_a): cambios representativos del ambiente.

Estas señales generan variaciones en parámetros dependientes como la densidad del aire (ρ_a), la masa efectiva (m) y la constante dinámica de la planta (a), reproduciendo un escenario de operación realista. Los valores de dichas señales dependientes utilizadas se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valores representativos de las señales de entrada utilizadas en la simulación.

Tiempo (s)	p (Pa)	p_a (Pa)	T_p (K)	T_a (K)	h_a (%)
0–20	206842	83110	293.24	292.85	31.4
80–100	2068423	82996	293.34	292.95	31.4
120–140	2895793	82988	293.46	293.15	32.1
180–200	4136847	82988	293.48	293.15	32.0

La tabla completa de valores discretos que se utilizaron en simulación se presenta en el Anexo B.

En la Figura 6.2 las señales de presión mostradas representan el ciclo de trabajo ascendente simulado durante el proceso de calibración. La presión nominal $p(t)$ se modela mediante una rampa escalonada ascendente y descendente, lo que permite evaluar el comportamiento de un proceso de calibración típico. Por su parte, la presión atmosférica $p_a(t)$ presenta variaciones de menor magnitud, representando las pequeñas perturbaciones ambientales que afectan la dinámica del sistema.

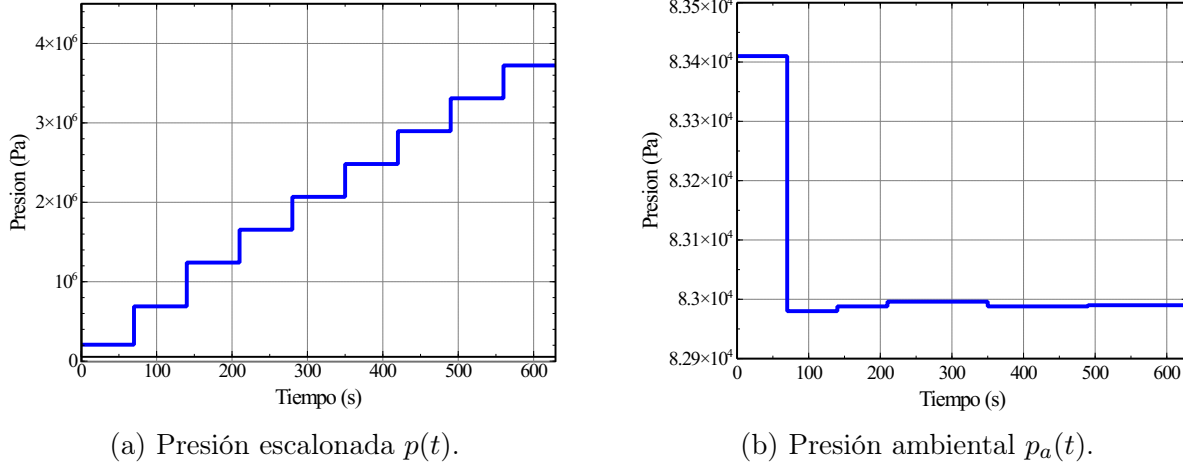
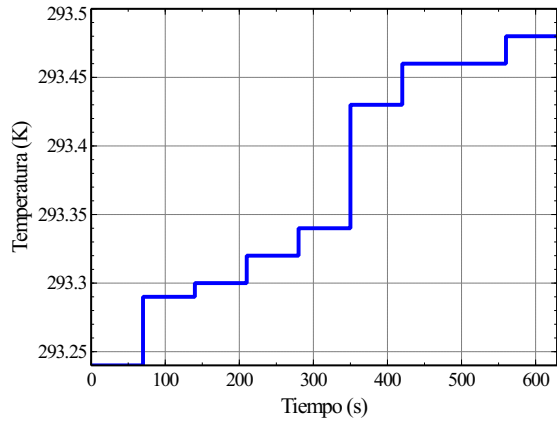
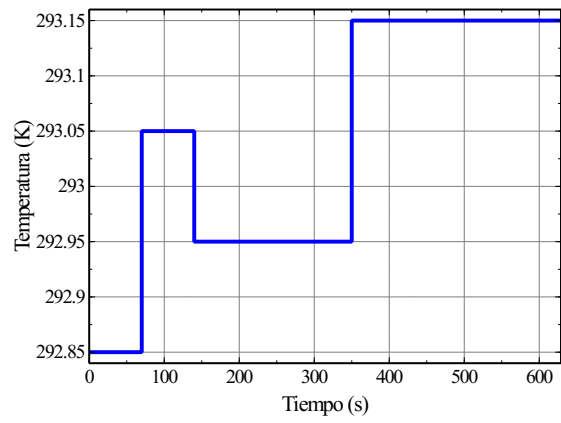


Figura 6.2. Señales de presión utilizadas como entradas en la simulación.

Las variables térmicas ilustradas en la Figura 6.3 muestran los cambios de presión, reflejando el comportamiento físico del sistema. La temperatura del pistón $T_p(t)$ presenta variaciones relacionadas con el trabajo mecánico, mientras que la temperatura ambiente $T_a(t)$.



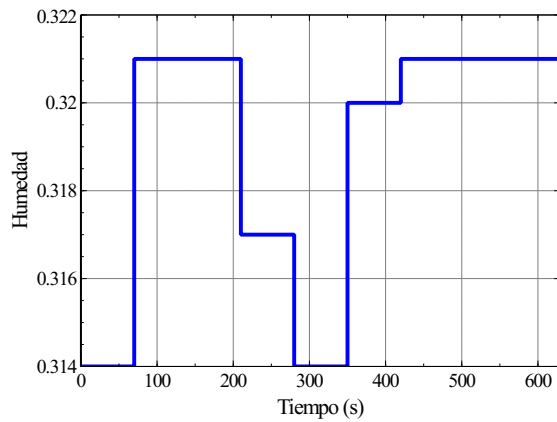
(a) Temperatura del pistón $T_p(t)$.



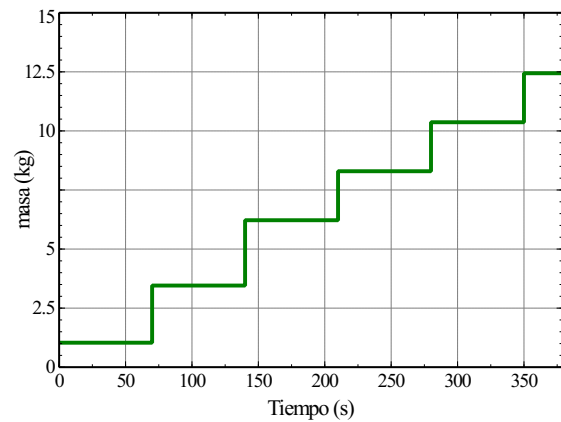
(b) Temperatura ambiental $T_a(t)$.

Figura 6.3. Señales térmicas empleadas en la simulación.

En la Figura 6.4 se muestran tanto la variable independiente como la variable dependiente de las señales ambientales. La humedad relativa $h_a(t)$ representa las fluctuaciones del lugar de trabajo y la masa efectiva $m(t)$ representa el valor de las pesas colocadas en el pistón.



(a) Humedad relativa $h_a(t)$.



(b) Masa efectiva $m(t)$.

Figura 6.4. Señales ambientales utilizadas como entradas en la simulación.

La Figura 6.5 presenta las variables dependientes de las señales ambientales y de presión. La densidad del aire $\rho_a(t)$ y la constante dinámica $a(t)$ muestran variaciones coherentes con los cambios introducidos en las señales de entrada.

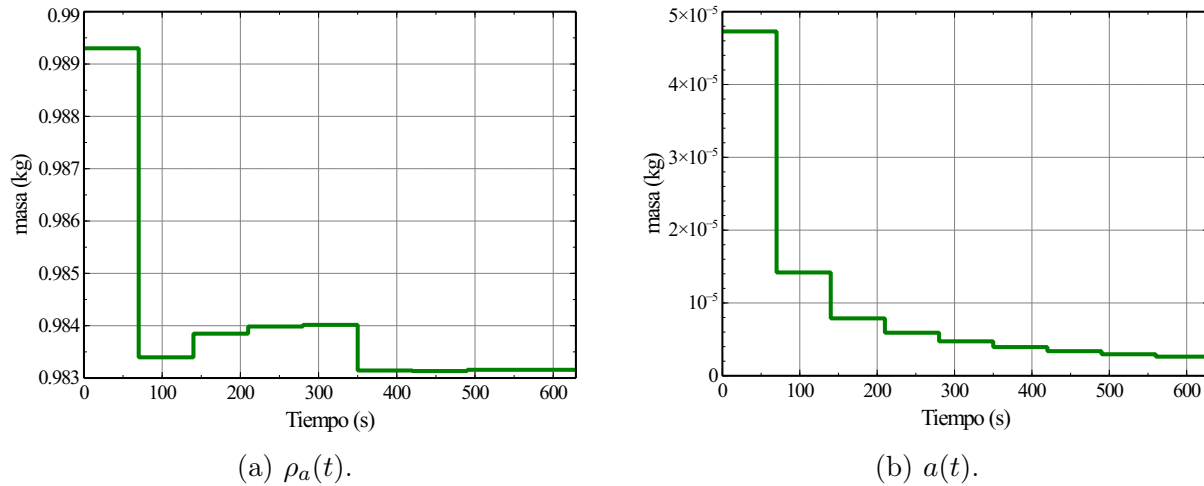


Figura 6.5. Variables dependientes utilizadas en la simulación.

Estas señales permiten analizar la capacidad del modelo para adaptarse a cambios de carga y a perturbaciones externas, reproduciendo condiciones similares a las observadas en la operación real.

6.1.2. Respuesta del sistema en lazo cerrado

Bajo las señales de entrada definidas, se evaluó la respuesta del sistema en lazo cerrado con el controlador PID. Las principales variables del sistema:

- La presión aplicada por el actuador.
- La posición del pistón $x_1(t)$, como variable controlada.

La Figura 6.6 permite observar la señal efectiva aplicada al actuador, resultado de sumar la presión base con la corrección generada por el controlador.

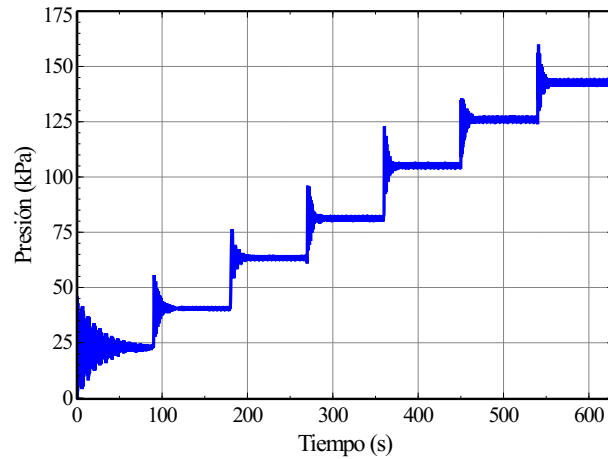


Figura 6.6. Señal de presión de desfase entre la referencia y la salida.

La Figura 6.7 muestra que la variable controlada $x_1(t)$ converge y se mantiene cercana al punto de equilibrio durante el ciclo simulado. La respuesta presenta un sobreimpulso a cada variación en la señal de presión de entrada, logrando estabilizarse en el punto de equilibrio original.

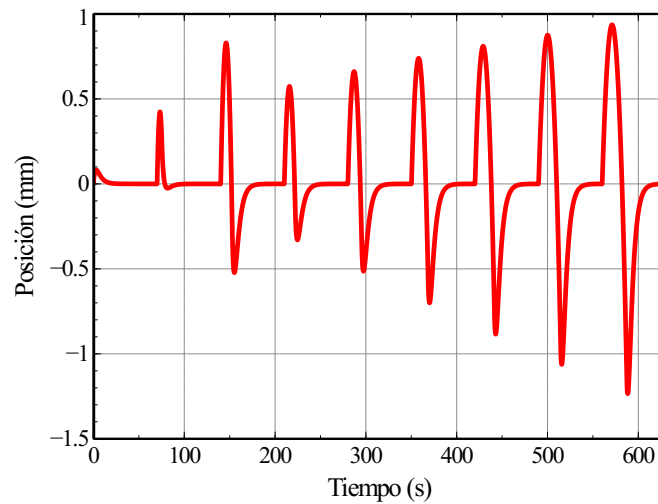


Figura 6.7. Respuesta de la posición del pistón $x_1(t)$ (punto de equilibrio) en lazo cerrado con controlador PID.

Los resultados muestran que el controlador PID mantiene el punto de equilibrio en su posición incluso ante variaciones combinadas de presión y condiciones ambientales.

El sistema presenta una respuesta subamortiguada, con sobreimpulso y un tiempo de establecimiento adecuado para las condiciones simuladas.

6.2. Resultados experimentales con control manual

6.2.1. Condiciones de la prueba

La prueba experimental sin implementar un control automático se realizó bajo el procedimiento habitual de calibración, donde la presión suministrada al sistema se ajusta manualmente y solo se realiza el proceso de adquisición de datos. Durante el proceso de calibración se midieron todas las variables involucradas en dicho proceso.

Las condiciones promedio durante la prueba fueron:

- Temperatura ambiente: 293.57 K.
- Temperatura del pistón: 287.56 K.
- Humedad relativa: 38 %
- Presión atmosférica: 83.550 kPa.

Dichos valores permanecieron dentro del rango de trabajo normal y no se aplicaron correcciones automáticas.

6.2.2. Respuesta del sistema sin control automático

En la Figura 6.8 se muestra la señal aplicada al actuador, donde se observan los ajustes realizados por el operador, lo que genera cambios bruscos en la presión sin una corrección continua.

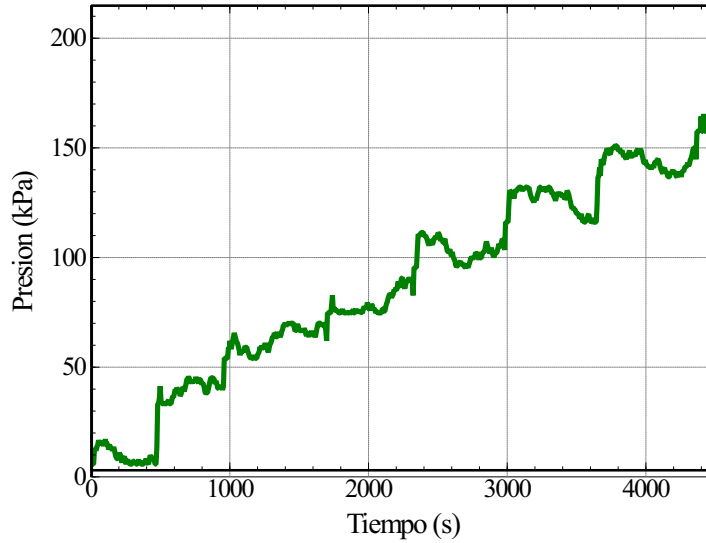


Figura 6.8. Presión aplicada al actuador durante operación manual.

La Figura 6.9 muestra la posición del pistón durante la operación manual. Se observa que la posición presenta variaciones asociadas a cambios en las condiciones de operación y ajustes manuales de presión.

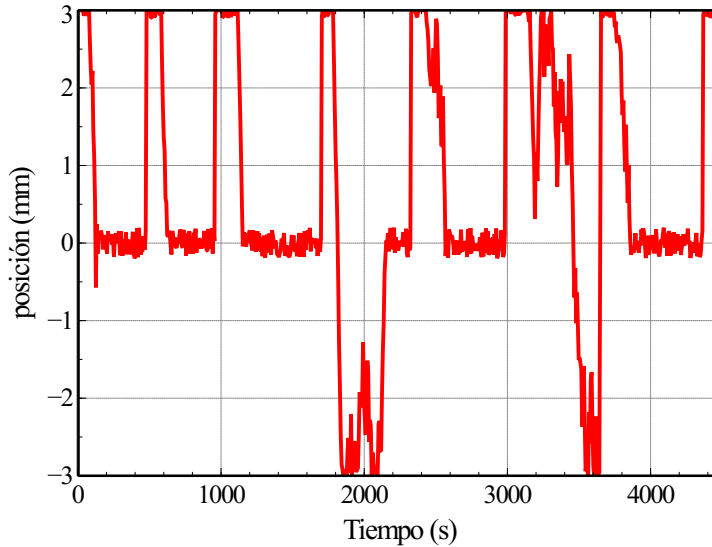


Figura 6.9. Posición del pistón durante calibración manual.

Se observa que el sistema no mantiene el punto de equilibrio de forma estable, lo que provoca que el error permanezca durante intervalos prolongados y su corrección dependa de la habilidad del operador para realizar ajustes.

6.3. Resultados experimentales con controlador PID

6.3.1. Condiciones de la prueba

La prueba experimental con control automático se realizó activando el controlador PID digital implementado en la Raspberry Pi 4 con un período de muestreo de $T_s = 2$ s.

Las condiciones ambientales durante la prueba se mantuvieron similares a las del caso manual, permitiendo una comparación directa entre ellos.

La señal de control generada por el PID, equivalente a la corrección de presión $\Delta p(t)$, se presenta en la Figura 6.10. Como se observa, la acción de control se ajusta de manera dinámica en función del error medido, produciendo un sobreimpulso al inicio, pero posteriormente con correcciones suaves y continuas que permiten mantener estable el punto de equilibrio.

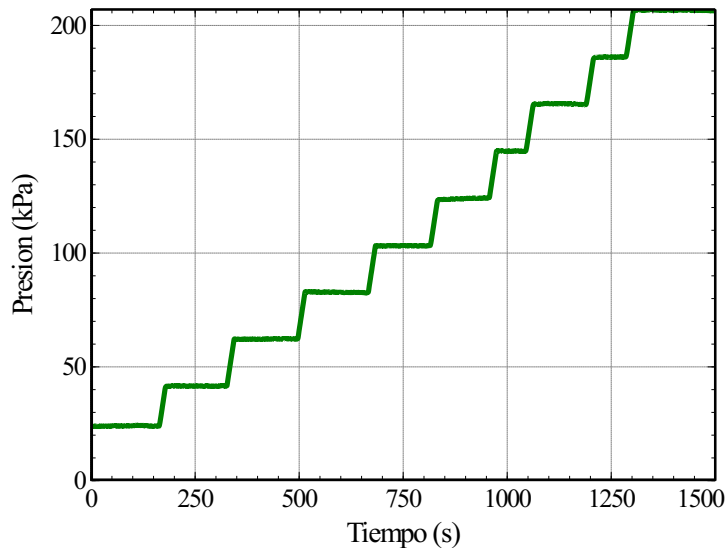


Figura 6.10. Señal de corrección de presión generada por el controlador.

La respuesta de la variable controlada se presenta en la Figura 6.11. Se observa que la posición del pistón experimenta una desviación que alcanza aproximadamente -3 mm durante cada cambio de presión. Este comportamiento se debe a la intervención manual para la modificación de las masas aplicadas. Posteriormente, el sistema converge nuevamente hacia el punto de equilibrio durante el resto del ciclo de operación. En comparación

con el modo manual, el sistema bajo control automático presenta menores amplitudes de desviación y un restablecimiento más rápido del equilibrio.

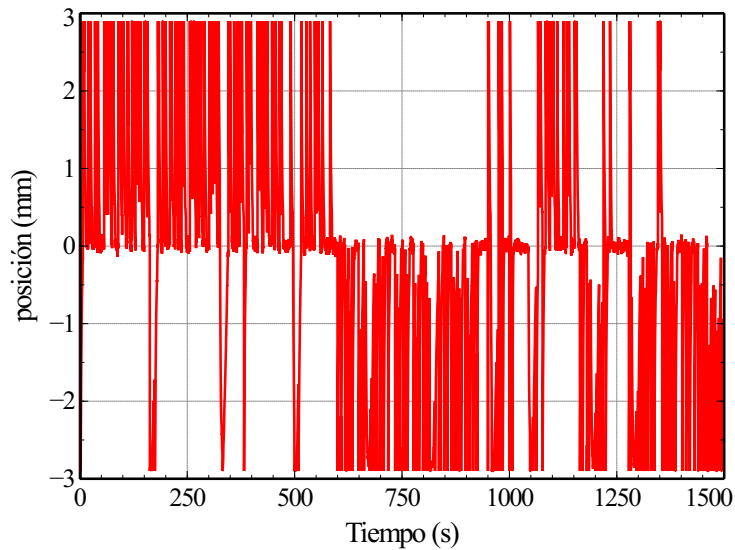


Figura 6.11. Posición del pistón en lazo cerrado con controlador PID.

En comparación con la operación manual, el controlador PID reduce la magnitud y duración de las desviaciones respecto al punto de equilibrio. La corrección continua de presión permite mantener el error acotado y mejorar la estabilidad del sistema ante variaciones ambientales y cambios de punto de operación.

6.4. Comparación de desempeño

La Tabla 6.2 presenta la comparación cuantitativa del desempeño entre la simulación del modelo, la operación manual tradicional y el sistema con control automático PID.

Tabla 6.2. Comparación de desempeño entre simulación, operación manual y control PID.

Parámetro	Simulación	Manual	PID
Error máximo (mm)	2.900	3.000	2.900
Error promedio (mm)	0.284	1.823	0.986
Error en régimen (mm)	0.001	1.450	1.034
Tiempo de establecimiento (s) (≥ 5 s dentro)	21.750	174.000	29.250
Tiempo fuera de ± 0.1 mm (s)	142.00	9834.00	2172.75

Como se observa, la simulación exhibe el comportamiento más ideal, caracterizado por menores valores de error máximo, error promedio y desviación en régimen permanente. Esto se debe a que el modelo matemático no considera efectos no lineales como fricción estática, histéresis mecánica o perturbaciones externas.

En la operación manual, si bien el sistema logra estabilizarse alrededor del punto de equilibrio, se observan variaciones constantes y de mayor amplitud, reflejadas en un incremento del error máximo y del tiempo fuera de la banda de ± 0.1 mm. Dichas variaciones se relacionan con la intervención humana durante los ajustes de masa y presión. Además, un ciclo completo de calibración tuvo una duración aproximada de 3 horas con 30 minutos, evidenciando una menor eficiencia operativa.

El sistema con control PID presenta una reducción en la amplitud de las desviaciones y en el tiempo de establecimiento, manteniendo la posición dentro de la banda de error durante la mayor parte del ciclo de operación. La duración total de la prueba automatizada fue de aproximadamente 40 minutos en el ciclo completo ascendente - descendente, lo que representa una mejora sustancial en términos de tiempo y repetibilidad.

Es importante señalar que tanto en el modo manual como en el controlado se observaron eventos ocasionales atribuidos a fricción estática en el conjunto pistón-cilindro y a la presencia de partículas contaminantes en la superficie de contacto, que provocaron perturbaciones ocasionales. Sin embargo, el control automático demostró una mayor capacidad de recuperación frente a dichas perturbaciones.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se desarrolló el modelo dinámico en espacio de estados de una balanza de pesos muertos utilizada como patrón de presión, considerando tanto los parámetros físicos del sistema como las condiciones ambientales. El análisis del modelo permitió identificar que el sistema presenta dos polos en el origen, lo cual evidencia su carácter de inestabilidad en lazo abierto y justifica la necesidad de un esquema de control en lazo cerrado.

Se evaluaron controladores tipo PD, PI y PID mediante simulaciones en MATLAB/Simulink, analizando su desempeño en términos de estabilidad, tiempo de establecimiento y conservación del punto de equilibrio. Los resultados mostraron que el controlador PI genera inestabilidad bajo las condiciones evaluadas. El controlador PD aunque ofrece una respuesta rápida y amortiguada, cambia el punto de equilibrio dependiendo de los parámetros de entrada o de las condiciones ambientales del sistema. El controlador PID demostró ser la estrategia más adecuada, debido a que conserva en la salida el punto de equilibrio original, sin importar los cambios en los parámetros evaluados.

Los resultados experimentales confirmaron la validez del modelo teórico, observándose una reducción importante en las oscilaciones y en el tiempo total del ciclo de calibración en comparación con la operación manual.

Se comprobó que el sistema automatizado mejora la repetibilidad del proceso, reduce la intervención humana y disminuye el tiempo de calibración, creando una metodología más eficiente y trazable para la regulación automática de presión.

Como líneas de trabajo futuro se propone el desarrollo de un modelo no lineal que incorpore explícitamente efectos de fricción estática y dinámica en el conjunto pistón-cilindro, con el fin de mejorar la precisión de la predicción del comportamiento real del sistema.

Asimismo, se plantea la evaluación de técnicas de control robusto o adaptativo que permitan compensar perturbaciones paramétricas y ambientales en tiempo real.

Finalmente, se propone la automatización completa del sistema mediante la implementación de un mecanismo automático de selección y colocación de masas patrón, así como la integración del cálculo automático de incertidumbre metrológica, conforme a la normativa.

Bibliografía

- [1] J. Rodríguez, L. Gómez, and R. Pérez, “Gestión metrológica para la calibración de la presión intrauterina en monitores fetales,” *I+D Revista de Investigaciones*, vol. 9, no. 1, 2017.
- [2] A. Valenzuela Gregorio, “Implementación de interfaz de control de laboratorio de radiofrecuencia en python,” Master’s thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2020.
- [3] C. M. Sutton, “The pressure balance as an absolute pressure standard,” *Metrologia*, vol. 30, pp. 591–594, 1993.
- [4] “6270A pressure controller/calibrator service manual,” Manual de servicio, Fluke Corporation, 2016.
- [5] J. C. Torres Guzmán, L. A. Santander Romero, and P. Olvera Arana, “Balanzas de presión,” Centro Nacional de Metrología (CENAM), El Marqués, México, Aug. 2005, reporte técnico.
- [6] H. O. Nava Jaimes and M. I. López Martínez, “Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en los servicios de calibración de balanzas de presión,” Guía técnica, Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), México, Nov. 2012.
- [7] “NOM-013-SCFI-2004: Instrumentos de medición—manómetros con elemento elástico—especificaciones y métodos de prueba,” Norma Oficial Mexicana, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas (DGN), México, 2004.
- [8] “NMX-CH-058-1994: Instrumentos de medición—manómetros con elemento elástico—método de calibración con balanza de pesos muertos,” Norma Mexicana,

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), Dirección General de Normas (DGN), México, 1994.

- [9] “NMX-CH-3-1993-SCFI: Instrumentos de medición—manómetros con elemento elástico—especificaciones,” Norma Mexicana, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), Dirección General de Normas (DGN), México, 1993.
- [10] L. L. Gutiérrez Cortés, “Diseño de un sistema de automatización para una cámara de vacío empleada para la calibración de barómetros en presión absoluta,” Master’s thesis, Fundación Universidad de América, Colombia, 2022.
- [11] A. Martínez, M. López, and J. Torres, “Calibración de un sistema de distribución de agua complejo a partir de variables SCADA,” *Revista de Ingeniería Hidráulica*, vol. 14, no. 2, 2020.
- [12] J. C. Torres Guzmán, B. Soriano Cardona, and P. Olvera Arana, “Medición primaria de presión barométrica,” in *Memorias del Segundo Congreso Internacional Metrocal*, Chile, 2001.
- [13] Á. Núñez Valle, “Control de un tanque de presión mediante el módulo PID de un autómatas programable,” Master’s thesis, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, Jun. 2011.
- [14] L. E. G. Jaimes and M. Arroyave-Giraldo, “Modelación, simulación y control de un levitador neumático,” *Revista Politécnica*, vol. 11, pp. 59–66, Jun. 2015.
- [15] C. M. Sutton, M. P. Fitzgerald, and D. G. Jack, “An initial investigation of the damped resonant behaviour of gas-operated pressure balances,” *Measurement*, vol. 45, no. 10, pp. 2476–2478, 2012.
- [16] “NMX-Z-55-2009: Vocabulario internacional de metrología (VIM). conceptos fundamentales y generales, términos asociados,” Norma Mexicana, Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC), México, 2009.

- [17] J. C. Torres Guzmán, B. Soriano Cardona, and P. Olvera Arana, “Medición primaria de presión barométrica,” in *Memorias del Segundo Congreso Internacional Metrocal*, Chile, 2001.
- [18] P. O. Arana, J. C. Torres Guzmán, and J. Aranzolo Suárez, “Ensayo de aptitud no. CENAM-EA-720/P.01 en el intervalo de medición de 7 MPa a 50 MPa en presión hidráulica,” Informe técnico, Centro Nacional de Metrología (CENAM), México, n.d.
- [19] M. Girard and P. Delajoud, “Automated mass handling for high performance pressure balances,” in *Theory and Applications in Laboratories and Industry*. Cairo: IMEKO, Feb. 2005.
- [20] J. Garcia and E. Smith, *Exploration of Quantum Algorithms in the 21st Century*. New York, NY, USA: Quantum Press, 2024.
- [21] “Series 2100 operation manual PN-0014896001-J1: Digital pressure gauge,” Manual de operación, Mensor Corporation, 2006.
- [22] “1620A thermo-hygrometer user’s guide,” Manual de usuario, Fluke Corporation, 2003.
- [23] Raspberry Pi Ltd., “Raspberry Pi 4 Model B Datasheet,” Technical datasheet, 2024.
- [24] R. J. Tocci, N. S. Widmer, and G. L. Moss, *Digital Systems: Principles and Applications*. Pearson, 2011.
- [25] L. M. P. Pérez and L. O. B. Santiago, “Impacto de la nueva fórmula de la densidad del aire CIPM-2007,” in *Simposio de Metrología 2010*. El Marqués, México: Centro Nacional de Metrología (CENAM), Oct. 2010.
- [26] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [27] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020.

Anexo A

Propiedades físicas de las masas de la balanza de pesos muertos [3]

Valor Nominal	Corrección masa	Incertidumbre Real	Volumen	Incertidumbre de volumen	Valor corregido	Densidad
g	mg	mg	cm ³	cm ³	g	kg/m ³
200	-11.857961	0.123750385	12.82051282	0.074019268	199.988142	15600
200	-5.5051431	0.123613211	12.82051282	0.074019268	199.9944949	15600
200	2.975248665	0.229414731	25.25252525	0.145795529	200.0029752	7920
0.01	0.03006787	0.002333077	0.001262626	7.36532E-06	0.010030068	7920
0.02	0.032985465	0.002344386	0.002525253	1.46341E-05	0.020032985	7920
0.02	-0.0115148	0.002414334	0.002525253	1.46341E-05	0.019988485	7920
0.05	0.002613129	0.002561758	0.006313131	3.64877E-05	0.050002613	7920
0.1	0.033101726	0.003261947	0.012626263	7.29281E-05	0.100033102	7920
0.2	0.012251973	0.004832721	0.025252525	0.000145817	0.200012252	7920
0.2	0.018261355	0.004847931	0.025252525	0.000145817	0.200018261	7920
0.5	-0.076175	0.0104686	0.063131313	0.000364504	0.499923824	7920
1	0.010019416	0.005366099	0.126262626	0.00072899	1.000010019	7920
2	-0.0318619	0.009777688	0.252525253	0.001457964	1.999968138	7920
2	0.097263976	0.01014831	0.252525253	0.001457964	2.000097264	7920
5	0.008484754	0.020466751	0.631313131	0.003644894	5.000008485	7920
10	0.317349482	0.040245964	1.262626263	0.007289781	10.00031735	7920
20	0.513468043	0.034668988	2.525252525	0.014579556	20.00051347	7920
20	0.814964373	0.035030527	2.525252525	0.014579556	20.00081496	7920
50	-0.1196837	0.058289299	6.313131313	0.036448883	49.99988032	7920
100	4.715737677	0.122964523	12.62626263	0.072897764	100.0047157	7920
200	3.409430956	0.233155192	25.25252525	0.145795529	200.0034094	7920
200	4.291644522	0.230558491	25.25252525	0.145795529	200.0042916	7920
500	5.512174201	0.573303213	63.13131313	0.364488821	500.0055122	7920
1000	7.392719523	1.42625939	126.2626263	0.728977643	1000.007393	7920
2000	-0.8212887	2.474442926	252.5252525	1.457955286	1999.999179	7920
2000	2.175276693	2.507203615	252.5252525	1.457955286	2000.002175	7920
5000	-999969.79	5.185599319	631.3131313	3.644888215	4000.030206	7920
1000	-200011.84	1.449285732	126.2626263	0.728977643	799.9881542	7920

Anexo B

Datos de señales de entrada de simulación

Tiempo (s)	Presión a calibrar p (Pa)	Presión ambiental pa (Pa)	Temperatura del Pistón Tp (K)	Temperatura ambiente Ta (K)	Humedad ambiente ha (%)
0-20	23789.52	83410	293.24	292.85	31.4
20-40	41368.56	82980	293.29	293.05	32.1
40-60	62052.84	82988	293.30	292.95	32.1
60-80	82737.12	82996	293.32	292.95	31.7
80-100	103421.40	82996	293.34	292.95	31.4
100-120	124105.68	82988	293.43	293.15	32.0
120-140	144789.96	82988	293.46	293.15	32.1
140-160	165474.24	82990	293.46	293.15	32.1
160-180	186158.52	82990	293.48	293.15	32.1
180-200	206842.80	82988	293.48	293.15	32.0
200-220	186158.52	82990	293.48	293.15	32.1
220-240	165474.24	82990	293.46	293.15	32.1
240-260	144789.96	82988	293.46	293.15	32.1
260-280	124105.68	82988	293.43	293.15	32.0
280-300	103421.40	82996	293.34	292.95	31.4
300-320	82737.12	82996	293.32	292.95	31.7
320-340	62052.84	82988	293.30	292.95	32.1
340-360	41368.56	82980	293.29	293.05	32.1
360-380	206842	83410	293.24	292.85	31.4