

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y
COMPUTACIÓN**



**“MODERNIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL
MULTIVARIABLE EN MATLAB PARA UNA ESTACIÓN
DIDÁCTICA DE REACCIONES ÁCIDO-BASE”**

Informe de Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Erik Josue Moncayo Ordoñez

Joaquín Sebastián Rendón Pantoja

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía constante y darme la fortaleza necesaria para alcanzar este logro. A mis padres, Miguel Moncayo y Erika Ordoñez, así como a mi abuela Mercedes Balladares, pilares fundamentales en mi vida, quienes siempre me han brindado su amor incondicional.

A mi abuelo Alfredo Ordoñez, que desde el cielo sé que me acompaña. A mi tía Betty Olmedo, por su apoyo y sabios consejos que me ayudaron a seguir adelante en esta carrera.

Y a mis amigos más cercanos, quienes con su compañía y ánimo me sostuvieron en los momentos más difíciles durante estos cuatro años de formación.

Erik Josue Moncayo
Ordoñez

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis padres, Pedro Rendon y Mariela Pantoja, cuyo apoyo incondicional y guía han sido fundamentales para alcanzar esta meta y mantenerme firme en el objetivo. A mi abuelo, Segundo Pantoja, que siempre me ha tenido en sus oraciones y me recibe con un fuerte abrazo cada vez que regreso a casa. A mis hermanos, Pedro y Diego, con los que he compartido las dificultades de estos años de estudio. Y a mi novia, Anahí, quien me ha inspirado y motivado a ir siempre más allá, a dar ese extra que transforma el esfuerzo en un verdadero logro.

Joaquín Sebastián Rendón
Pantoja

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por darnos la fortaleza y la sabiduría para culminar este proyecto. De manera especial, expresamos nuestra gratitud al Ph.D. Carlos Salazar y al Ph.D. Efrén Herrera por su valiosa orientación en el proyecto de la materia integradora, así como a la MSc Adriana Aguirre, al Ing. Bruno Díaz y a la MSc Mónica Miranda, quienes brindaron una guía fundamental en el desarrollo de esta investigación.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Erik Josue Moncayo Ordoñez* y *Joaquín Sebastián Rendón Pantoja* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Erik Moncayo

AUTOR 1



Joaquin Rendon

AUTOR 2

EVALUADORES

Efrén Herrera Muentes, Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA

Carlos Salazar Lopez, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad la modernización de una estación didáctica de pH y temperatura, con el propósito de actualizar su funcionamiento mediante tecnologías industriales actuales y fortalecer el aprendizaje práctico de los estudiantes en un entorno experimental. La hipótesis plantea la posibilidad de contar con una plataforma confiable mediante la integración de sensores, actuadores y un sistema de control en MATLAB. La justificación se fundamenta en que la estación original presentaba limitaciones y componentes obsoletos que disminuían su valor pedagógico, por lo cual su modernización asegura un recurso vigente y pertinente para la formación académica en control e instrumentación.

En el desarrollo se integraron sensores de pH y temperatura (0–10 V), bombas peristálticas (4–20 mA), motores de 12 V y una celda Peltier controlada por el XY-160D. El LabJack U3-HV se empleó como interfaz con MATLAB y el cableado se realizó conforme a la norma IEC 60446. Adicionalmente, se incorporaron convertidores voltaje–corriente, un potenciómetro, un relé y soluciones químicas preparadas mediante titulación ácido–base.

Los ensayos demostraron que el sistema de control mantuvo la estabilidad regulando principalmente la bomba básica, mientras que la incorporación de la bomba ácida al 10% generó variaciones controladas en el pH. Los agitadores y la bomba sumergible permanecieron operativos, asegurando la homogeneidad de la mezcla.

En conclusión, la estación didáctica se encuentra modernizada exitosamente, consolidándose como una herramienta actualizada, versátil y de gran valor para la enseñanza de la automatización y el control de procesos.

Palabras clave: Control, estación didáctica, ácido, base

ABSTRACT

The purpose of this project is to modernize a pH and temperature teaching station, with the goal of updating its operation using current industrial technologies and strengthening the students' hands-on learning in an experimental environment. The hypothesis posits the feasibility of establishing a reliable platform through the integration of sensors, actuators, and a control system in MATLAB. The justification is based on the fact that the original station had limitations and obsolete components that diminished its pedagogical value; therefore, its modernization ensures a current and relevant resource for academic training in control and instrumentation.

The development integrated pH and temperature sensors (0–10 V), peristaltic pumps (4–20 mA), 12 V motors, and a Peltier cell controlled by the XY-160D. The LabJack U3-HV was used as an interface with MATLAB, and the wiring was executed in accordance with the IEC 60446 standard. Additionally, voltage-to-current converters, a potentiometer, a relay, and chemical solutions prepared by acid-base titration were incorporated.

Testing demonstrated that the control system maintained stability primarily by regulating the base pump, while the introduction of the 10% acid pump generated controlled variations in pH. The agitators and the submersible pump remained operational, ensuring mixture homogeneity.

In conclusion, the teaching station has been successfully modernized, establishing it as an up-to-date, versatile, and highly valuable tool for teaching process automation and control.

Keywords: Control, didactic station, acid, base

INDICE GENERAL

1.	CAPÍTULO 1	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1.2	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2	OBJETIVOS	4
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3	MARCO TEÓRICO	5
1.3.1	FUNDAMENTOS FISICOQUÍMICOS DEL PROCESO	5
1.3.2	REACCIONES ÁCIDO-BASE Y PH	5
1.3.3	CONCENTRACIÓN	6
1.3.4	TEMPERATURA	6
1.3.5	CONTROL AUTOMÁTICO	6
1.3.5.1	CONTROLADORES Y EL LAZO CERRADO	7
1.3.5.2	SISTEMAS MULTIVARIABLE (MIMO)	8
1.3.5.3	TIEMPO DISCRETO	8
1.3.5.4	RETARDO DE SEÑALES	9
1.3.5.5	APROXIMACIÓN DE PADÉ	10
1.3.5.6	FILTRADO DE SEÑALES	10
1.3.6	INSTRUMENTACIÓN E INTERFACES DE ADQUISICIÓN DE DATOS	
	10	
	1.3.6.1 SENSORES, TRANSMISORES, ACTUADORES Y FUENTES DE ALIMENTACIÓN	11
	1.3.6.2 PWM Y DUTY CYCLE	11
	1.3.6.3 INTERFACES DE ADQUISICIÓN CON MATLAB Y SIMULINK	12
2.	CAPÍTULO 2	13
2.1	METODOLOGÍA	13

2.1.1	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE COMPONENTES INSTALADOS.....	13
2.1.2	RECABLEADO Y ADECUACIÓN DEL TABLERO PARA LA MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA	15
2.1.3	ELABORACIÓN DE DIAGRAMA ELÉCTRICO Y P&ID	16
2.1.4	FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS COMPONENTES	17
2.1.5	SUSTANCIAS ADQUIRIDAS Y PREPARACIÓN PARA EL EXPERIMENTO	20
2.1.5.1	REACTIVOS ADQUIRIDOS.....	20
2.1.5.2	TITULACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO	20
2.1.5.3	DILUCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO	21
2.1.5.4	TITULACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO	22
2.1.5.5	DILUCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO	23
2.1.6	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA.....	23
2.1.6.1	LABJACK U3-HV	23
2.1.6.2	BOMBAS PERISTÁLTICAS	24
2.1.6.3	SENSOR DE PH Y TEMPERATURA	27
2.1.6.4	LABJACK Y SIMULINK	27
2.1.6.5	INTERCAMBIADOR DE CALOR	29
2.1.6.6	PRUEBA DE NEUTRALIZACIÓN CON LAS SUSTANCIAS DILUIDAS	31
2.1.7	FILTRADO DE SEÑALES.....	32
2.1.7.1	CRITERIO DE SELECCIÓN DEL FILTRO	32
2.1.7.2	IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO	32
2.1.8	MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	33
2.1.8.1	MODELO LINEALIZADO DEL REACTOR	33
2.1.8.2	CONDICIONES INICIALES, ASUNCIONES Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO	33
2.1.8.3	MODELADO MATEMÁTICO DEL REACTOR, ECUACIONES LOGARÍTMICAS	34

2.1.8.4	MODELADO MATEMÁTICO DEL REACTOR, ECUACIONES CAUDAL-CONCENTRACIÓN	35
2.1.8.5	PRUEBAS DEL MODELO MATEMÁTICO	37
2.1.8.6	LINEALIZACIÓN DE ECUACIONES DE CAUDAL-CONCENTRACIÓN 39	
2.1.8.7	VALIDACIÓN DEL MODELO LINEAL	41
2.1.8.8	DESARROLLO DEL CONTROLADOR	43
2.1.8.9	DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA	46
2.1.8.10	FT DE LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS Y RETARDO	47
2.1.9	PRUEBAS DEL CONTROLADOR EN LA ESTACIÓN DIDÁCTICA.	49
2.1.9.1	MODELO EN SIMULINK	49
3.	CAPÍTULO 3	51
3.1	RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
3.1.1	CONSIDERACIONES PREVIAS AL INICIO DE LOS ENSAYOS.....	51
3.1.2	PREPARACIÓN DEL MEDIO EXPERIMENTAL.....	52
3.1.3	PREPARACIÓN DE LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS	53
3.1.4	ENSAYO # 1	54
3.1.5	ENSAYO # 2.....	55
3.1.6	ENSAYO # 3.....	56
3.1.7	ENSAYO # 4	58
3.1.8	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	58
3.2	ANÁLISIS DE COSTOS	60
4.	CAPÍTULO 4	61
4.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
4.1.1	CONCLUSIONES	61
4.1.2	RECOMENDACIONES.....	62
	BIBLIOGRAFÍA	63
	APÉNDICES	64

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HV	High Voltage
FT	Función de transferencia
SP	Sobrepico
ESS	Error en estado estacionario
MIMO	Multiple input multiple output

SIMBOLOGÍA

L	Litro
mL	Mililitro
min	Minuto
mL/min	Mililitro por minuto
mol	Moles
mol/L	Moles por litro
pH	Potencial de Hidrógeno
V	Voltio
s	segundos
L/s	Listo por segundos
mA	Miliamperio
°C	Grados centígrados
qa	Caudal de ácido
qb	Caudal de base
Ca	Concentración del acido
Cb	Concentración de la base
rpm	Revoluciones por minuto

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de control (Autor propio, 2025)	7
Figura 1.2 Dinámica de un sistema MIMO (Autor propio, 2025)	8
Figura 1.3 Perdida de información debido a una mala selección del tiempo de muestreo (Autor propio, 2025)	9
Figura 2.1 Estado de los tomacorrientes (Autor propio, 2025)	13
Figura 2.2 Estado del tablero eléctrico previo al desarrollo del proyecto (Autor propio, 2025)	14
Figura 2.3 Diagrama eléctrico recibido (Autor propio, 2025)	15
Figura 2.4 Tablero eléctrico recableado luego del levantamiento inicial (Autor propio, 2025)	16
Figura 2.5 Diagrama de bloques de los sensores y actuadores (Autor propio, 2025) ...	16
Figura 2.6 Dispositivos controlados de forma manual (Autor propio, 2025)	17
Figura 2.7 Curva de Transferencia del Transmisor de pH y Temperatura (Autor propio, 2025)	18
Figura 2.8 Control de PWM a través de código en MATLAB (Autor propio, 2025)	24
Figura 2.9 Retardo de la acción de las bombas (Autor propio, 2025)	24
Figura 2.10 Diagrama en Simulink – FT de las bombas peristálticas (Autor propio, 2025)	25
Figura 2.11 Resultado de la prueba de la FT de las bombas peristálticas (Autor propio, 2025)	26
Figura 2.12 Representación de los datos obtenidos (Autor propio, 2025)	26
Figura 2.13 Lectura de la salida del transmisor de pH y Temperatura (Autor propio, 2025)	27
Figura 2.14 Parámetros del Bloque LabJackInterface (Autor propio, 2025)	28
Figura 2.15 Diagrama de la interfaz Simulink–LabJack mostrando las entradas y salidas escaladas. (Autor propio, 2025)	28
Figura 2.16 Respuesta en estado estable de los sensores visualizada en MATLAB (Autor propio, 2025)	29

Figura 2.17 Celdas Peltier calentando -3.2L (Autor propio, 2025).....	29
Figura 2.18 Celdas Peltier enfriando – 3.2L (Autor propio, 2025).....	30
Figura 2.19 Celdas Peltier enfriando – 3.2L (Autor propio, 2025).....	30
Figura 2.20 Ensayo con sustancias diluidas (Autor propio, 2025)	31
Figura 2.21 Ensayo con sustancias diluidas (Autor propio, 2025)	31
Figura 2.22 Comparación de data original vs data filtrada (Autor propio, 2025).....	32
Figura 2.23 Relación Linealizada Miranda R. (2012) alrededor de un pH=5 (Autor propio, 2025)	33
Figura 2.24 Ecuaciones no lineales del sistema representadas en Simulink (Autor propio, 2025)	35
Figura 2.25 Ecuaciones lineales del sistema representadas en Simulink (Autor propio, 2025)	37
Figura 2.26 Salida pH del modelo matemático (Autor propio, 2025)	37
Figura 2.27 Salida Volumen del modelo matemático (Autor propio, 2025).....	38
Figura 2.28 Modelo matemático (Autor propio, 2025)	38
Figura 2.29 Modelo en Simulink de la linealización realizada (Autor propio, 2025).....	40
Figura 2.30 Funciones de transferencia del sistema caudal-concentración (Autor propio, 2025)	40
Figura 2.31 Comparación de salidas de pH ante variación pulso (Autor propio, 2025)	41
Figura 2.32 Comparación de salidas de concentración ante variación pulso (Autor propio, 2025)	41
Figura 2.33 Comparación de salidas de Volumen ante variación pulso (Autor propio, 2025)	42
Figura 2.34 Diagrama utilizado para comparar las salidas (Autor propio, 2025)	43
Figura 2.35 Pruebas del controlador, modelo lineal vs modelo matemático (Autor propio, 2025)	44
Figura 2.36 Señales de control, modelo linealizado vs modelo matemático (Autor propio, 2025)	44
Figura 2.37 Variable concentración (Autor propio, 2025)	45
Figura 2.38 Salida de pH – Controlador (Autor propio, 2025).....	45

Figura 2.39 Discretización del Sistema con bloques Zero-Order Hold (Autor propio, 2025)	46
Figura 2.40 Respuesta al controlador del sistema discretizado (Autor propio, 2025)	46
Figura 2.41 Modelo Matemático definitivo (Autor propio, 2025)	47
Figura 2.42 FT de transferencia del modelo matemático (Autor propio, 2025)	47
Figura 2.43 Izquierda: Respuesta Inicial en Sisotool. Derecha: Respuesta con el controlador Sintonizado. (Autor propio, 2025)	48
Figura 2.44 Respuesta al control del modelo matemático (Autor propio, 2025)	48
Figura 2.45 Modelo usado para los ensayos con el controlador en la planta real (Autor propio, 2025)	49
Figura 2.46 Conversión de la señal de control (Autor propio, 2025)	49
Figura 2.47 Referencia, controlador (Autor propio, 2025)	50
Figura 2.48 Conversión de las salidas (Autor propio, 2025)	50
Figura 2.49 Vista general del diagrama de pruebas (Autor propio, 2025)	50
Figura 3.1 Altura de la punta de prueba de pH en el tanque (Autor propio, 2025)	51
Figura 3.2 Deformación observada en el tanque durante las pruebas de lazo abierto (Autor propio, 2025)	52
Figura 3.3 Filtrado de la sustancia inicial (Autor propio, 2025)	52
Figura 3.4 Ubicación de la botella de sustancia ácida durante los ensayos (Autor propio, 2025)	53
Figura 3.5 Monitoreo de las señales durante los ensayos (Autor propio, 2025)	53
Figura 3.6 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)	54
Figura 3.7 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)	55
Figura 3.8 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)	57
Figura 3.9 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)	58
Figura 3.10 Respuesta del controlador ante perturbaciones (Autor propio, 2025)	59
Figura 3.11 Referencia, error y señal de control (Autor propio, 2025)	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos del ensayo 1	55
Tabla 3.2 Datos del ensayo 2	56
Tabla 3.3 Datos del ensayo 3	57

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia moderna, el desarrollo de los sistemas de control e instrumentación ha sido una pieza clave en la transformación de los procesos productivos. La capacidad de monitorear y regular variables en tiempo real ha permitido que industrias de todo tipo incluyendo las de tratamiento de aguas operen de manera cada vez más segura, eficiente y automatizada. En particular, procesos como el tratamiento de plantas requieren una supervisión constante de variables críticas, entre ellas el pH y la temperatura, lo cual es posible gracias al uso de sensores industriales conectados a sistemas capaces de procesar datos y tomar decisiones en tiempo real.

En el ámbito universitario, este tipo de tecnologías no solo son objeto de estudio, sino también una herramienta esencial para la formación profesional. En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), el aprendizaje práctico complementa de forma indispensable la teoría impartida en las aulas. En este sentido, la estación didáctica que se aborda en esta tesis cumple un rol importante como laboratorio experimental para estudiantes de diversas carreras, como Ingeniería Química, Mecánica, Industrial, Electrónica y Automatización.

No obstante, con el paso del tiempo, muchos de los componentes de esta estación han quedado obsoletos o han dejado de funcionar adecuadamente, lo cual limita su utilidad como recurso formativo. En su estado actual, la estación no refleja las condiciones tecnológicas que predominan en el entorno industrial moderno, y esto representa una barrera para que los estudiantes puedan relacionar sus conocimientos con la práctica real.

Por esta razón, el presente proyecto propone la modernización integral de esta estación didáctica, con el objetivo de convertirla en un entorno actualizado, funcional y pedagógicamente valioso para el estudio de sensores actuadores y sistemas de control, donde, su aporte no se basa solamente en enriquecer la infraestructura del laboratorio, sino también, en aportar una herramienta que mejore el proceso de aprendizaje de los futuros profesionales de ESPOL.

1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el Laboratorio de Sistemas de Control de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) existe una estación didáctica para el control de pH mediante la mezcla de sustancias ácido-base, la cual actualmente no se encuentra operativa. Esta estación fue diseñada como una herramienta pedagógica para que los estudiantes puedan experimentar con sistemas reales de medición y control, sin embargo, debido al deterioro y mal funcionamiento de varios de sus componentes, no cumple actualmente con ese propósito formativo.

El responsable del laboratorio de sistemas de control, Ingeniero Dennys Cortez, ha planteado como requerimiento fundamental la reactivación de la planta mediante una solución que aproveche los conocimientos adquiridos por los estudiantes durante su formación académica, particularmente en las áreas de instrumentación, y diseño de sistemas de control.

La situación actual representa una limitación directa para el aprendizaje práctico de las futuras generaciones de estudiantes, ya que no cuentan con una plataforma funcional que les permita observar, medir, controlar y analizar el comportamiento dinámico de un sistema físico real.

La modernización de esta estación didáctica no solo busca devolverle la funcionalidad técnica sino también estandarizarla a las necesidades de enseñanza actuales de la universidad, convirtiéndola en un sistema que representa la realidad industrial moderna, dentro del marco académico.

1.1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las estaciones didácticas orientadas al control de procesos fisicoquímicos representan una herramienta clave en la formación de estudiantes de ingeniería. Los sistemas que basan su operación en reacciones químicas son comunes al representar operaciones críticas de distintos sectores críticos como el tratamiento de aguas, producción farmacéutica y la industria alimentaria.

En muchos entornos académicos, como el presente en el laboratorio de sistemas de control, estos procesos aún dependen de ajustes manuales, lo cual dista de la realidad industrial actual, donde procesos fisicoquímicos son llevado a cabo por sistemas de control robustos, altamente automatizados y sujetos a estrictos estándares de calidad. Por ejemplo, Seborg et al. (2011) destacan que los procesos químicos requieren técnicas de control multivariable sofisticadas para mantener condiciones operativas óptimas. En la misma línea, Kungwalrut et al. (2017) resalta la importancia de la validación y simulación de estas estrategias control, como en su sistema de dosificación química basado en la neutralización del pH en sistemas de ultrafiltración, para encontrar el enfoque que permita alcanzar los niveles óptimos de desempeño que requieren este tipo de sistemas.

La modernización de estaciones didácticas responde a la necesidad de integrar tecnologías actuales que permitan simular y controlar procesos reales de manera precisa y formativa. En este contexto, el estudio de la neutralización ácido-base ofrece un entorno propicio para aplicar conceptos fisicoquímicos y técnicas de control multivariable, mediante el uso de herramientas académicos e industriales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Modernizar la estación didáctica de neutralización de sustancias ácida-base mediante la integración de sensores, actuadores y controladores multivariables conectados a MATLAB a través de una tarjeta de adquisición de datos, optimizando el control del proceso para fortalecer la formación práctica de los estudiantes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar el estado actual de los componentes físicos y funcionales de la estación didáctica, utilizando herramientas de software de ingeniería, para establecer los requerimientos de actualización y rediseño.
- Elaborar un cronograma técnico de actividades, que permita organizar, registrar y supervisar de manera sistemática las intervenciones realizadas en la estación didáctica durante su modernización.
- Caracterizar dinámicamente la estación didáctica mediante pruebas en lazo abierto, considerando los nuevos sensores y actuadores integrados, con el fin de obtener el modelo representativo del sistema.
- Realizar un informe de la evaluación de desempeño de la estación didáctica frente a distintos tipos de controladores, utilizando herramientas de simulación como MATLAB, para comparar y seleccionar estrategias de control adecuadas al proceso.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 FUNDAMENTOS FISICOQUÍMICOS DEL PROCESO

La estación didáctica basa su funcionamiento en generar reacciones de forma controlada entre sustancias, como es el caso de la reacción de neutralización entre sustancias ácido-base. Comprender como varía el pH y su relación con variables como la temperatura, velocidad de agitación y la dosificación de reactivos es fundamental para desarrollar e implementar un sistema de control óptimo para el proceso. Estas variables afectan tanto las constantes de disociación como la dinámica de mezcla y reacción, influyendo directamente en la eficacia del control del pH (Shinsky, 2000)

1.3.2 REACCIONES ÁCIDO-BASE Y PH

Las reacciones ácido-base se caracterizan por la transferencia de protones $[H^+]$ entre las sustancias químicas involucradas. Según la teoría de Brønsted-Lowry, un ácido es una sustancia capaz de donar protones, mientras que una base es aquella que los acepta. En soluciones acuosas, el equilibrio entre los iones hidronio (H_3O^+) y los iones hidroxilo (OH^-) determina el valor del pH. A mayor concentración de iones hidronio, mayor es la capacidad de la solución para ceder protones, lo que la hace más ácida. Por el contrario, una mayor concentración de iones hidroxilo, caracteriza a la solución como básica o alcalina, al aumentar su capacidad de receptor protones.

El pH se calcula como:

$$pH = -\log[H^+] \quad (1.1)$$

La característica logarítmica del pH implica que incluso pequeñas variaciones en la concentración de iones hidronio pueden representar cambios significativos en el valor del pH, aunque realmente depende de cuál sea el pH inicial. Generalmente, una diferencia de una unidad en la escala de pH representa un cambio de un orden de magnitud en la concentración de protones, es decir, un incremento o disminución diez veces mayor (Gustafsson, Skrifvars, Sandstrom, & Waller, 1995).

1.3.3 CONCENTRACIÓN

Ayuda a determinar la proporción de una sustancia química, es decir define la cantidad de soluto y solvente en una reacción química. Existen diferentes formas de representar la concentración. Se clasifican de la siguiente manera.

- Molaridad: Se representa como el número de moles de soluto por litro de solución.
- Relación en porcentaje: Esta relación es porcentual donde se ve la cantidad de soluto en relación de la cantidad de solución y se subdivide en en peso (% m/m), en volumen (% v/v) o en peso-volumen (% m/v).
- Molalidad: Se representa como el número de moles por soluto por kilogramo de solvente
- Fracción molar: Es la representación del número de moles que existe en una sustancia con los moles totales de todas las sustancias presentes en la mezcla.
- Normalidad: Se representa como el número de equivalentes (gramos) de un soluto por volumen de litros de la solución.

1.3.4 TEMPERATURA

La temperatura tiene un efecto directo en propiedades físicas de las soluciones, directamente se ven involucradas en las reacciones ácido-base, la constante de disociación y la tasa de reacción; su cambio genera variaciones significativas del pH de las soluciones acuosas. La constante de disociación (K_a), permite conocer el grado en que una sustancia se separa en iones cuando al disolverse en agua (Gustafsson, Skrifvars, Sandstrom, & Waller, 1995). Así mismo, la tasa de reacción determina la velocidad con la que ocurren los procesos de transferencia de protones entre moléculas o iones. Ambos parámetros influyen en la dinámica del pH (González, 2017).

1.3.5 CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático es una disciplina que estudia métodos para regular el comportamiento dinámico de los sistemas mediante algoritmos y dispositivos capaces de ajustar continuamente variables de entrada con el objetivo de lograr que variables de salida alcancen un valor deseado, también conocido como referencias; incluso en presencia de perturbaciones externas o variaciones internas (Seborg, Edgar,

Mellichamp, & Doyle, 2016). En el proceso de neutralización intervienen múltiples factores fisicoquímicos que actúan como variables del sistema, tales como el pH, la temperatura, el caudal de reactivos y la velocidad de agitación. Con el objetivo de comprender los mecanismos en los que se fundamenta el sistema de control del proceso, se abordarán conceptos fundamentales como el control en lazo cerrado mediante controladores PID, el control multivariable (MIMO), y la identificación de sistemas para el modelado dinámico del proceso.

1.3.5.1 CONTROLADORES Y EL LAZO CERRADO

En un sistema de control en lazo cerrado, la variable de salida es continuamente comparada con una referencia o valor deseado, la diferencia entre ambas es denominada error y es la señal que alimenta el controlador, el cual ajusta la señal de control enviada al sistema con el objetivo de minimizar dicho error y mantener la salida dentro del rango deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. (Elfandi, 1996). Esta estructura permite corregir desviaciones provocadas por perturbaciones internas o externas y mejorar la estabilidad del proceso. En la Figura 1.1 se retrata los componentes y señales principales presentes en un sistema de control en lazo cerrado.

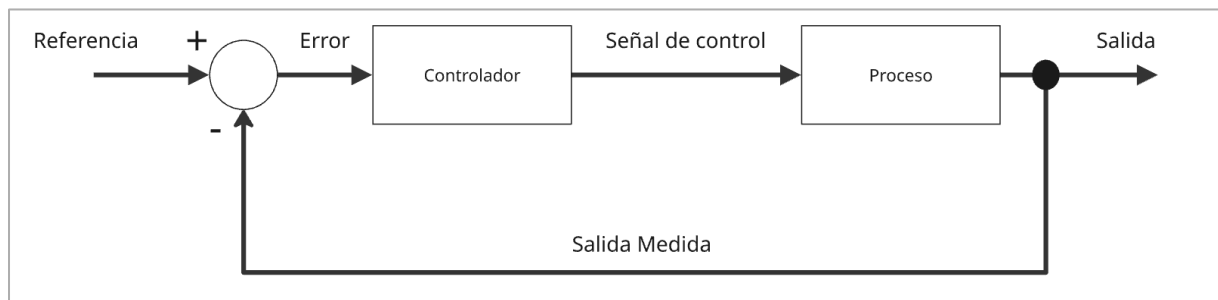


Figura 1.1 Sistema de control (Autor propio, 2025)

Para minimizar el error, los controladores basan su funcionamiento en estrategias de control que determinan como ajustar la señal recibida para generar la señal de control. Por ejemplo, el controlador PID, entre los más ampliamente utilizados, calcula la señal de control en función de tres componentes relacionados con el error: su valor instantáneo (componente proporcional), la integral del error acumulado en el tiempo (componente integral) y la derivada del error respecto al tiempo (componente derivativa). (Johan Åström & Murray, 2010). Estas componentes afectan directamente a características

dinámicas de la respuesta del sistema como su velocidad de respuesta, estabilidad, precisión, entre otras. Dichas características dinámicas constituyen los principales criterios de evaluación en el análisis comparativo entre distintos tipos de controladores.

1.3.5.2 SISTEMAS MULTIVARIABLE (MIMO)

En un sistema multivariable o MIMO (Multiple Input, Multiple Output), los valores de múltiples variables de entrada afectan simultáneamente a varias variables de salida. Este tipo de sistemas se caracteriza por la presencia de interacciones cruzadas entre las variables; por ello, el proceso de neutralización ácido-base puede ser considerado un sistema multivariable, dada la influencia conjunta de factores como el pH, la temperatura y el caudal de reactivos. Bongiorno Jr. y Park (2020) destacan que el control multivariable requiere técnicas especializadas para manejar las complejidades de estas interacciones y optimizar la estabilidad y eficiencia del sistema en su conjunto. En este tipo de sistemas, el uso de controladores clásicos como el PID puede resultar insuficiente debido a las interacciones entre variables. Por esta razón, se recurre a representaciones en espacio de estados y a técnicas como la realimentación de estados, el control por reubicación de polos o el control integral con observadores (Skogestad & Postlethwaite, 2005). La Figura 1.2 representa las distintas interacciones que pueden presentarse en un sistema MIMO.

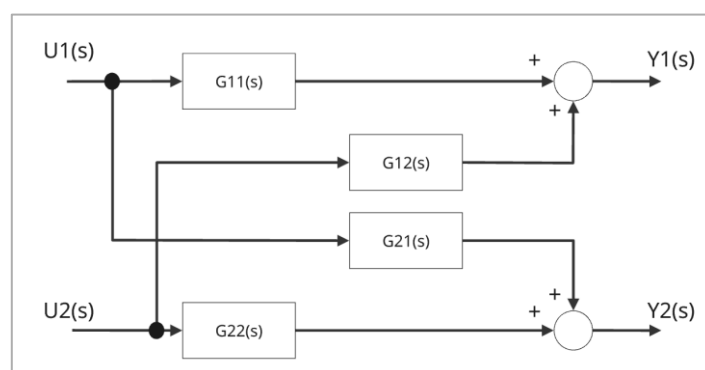


Figura 1.2 Dinámica de un sistema MIMO (Autor propio, 2025)

1.3.5.3 TIEMPO DISCRETO

Las interfaces que conectan sistemas reales con controladores digitales operan mediante la adquisición de datos en intervalos de tiempo definidos. Como resultado, las

señales procesadas por el controlador no corresponden a un dominio continuo, sino discreto, lo que implica que las variables del sistema son evaluadas y actualizadas únicamente en instantes específicos determinados por la frecuencia de muestreo. El Teorema de Muestreo de Nyquist Shannon establece que “la señal analógica debe muestrearse al menos al doble de su frecuencia máxima para poder ser reconstruida con fidelidad completa” (Zeng, Liu, & Yuan, 2024). En el control de procesos, la elección de un tiempo de muestreo adecuado es crucial. Un muestreo incorrecto puede resultar en una sobrecarga computacional del sistema o en la pérdida de información esencial como se puede observar en la Figura 1.3.

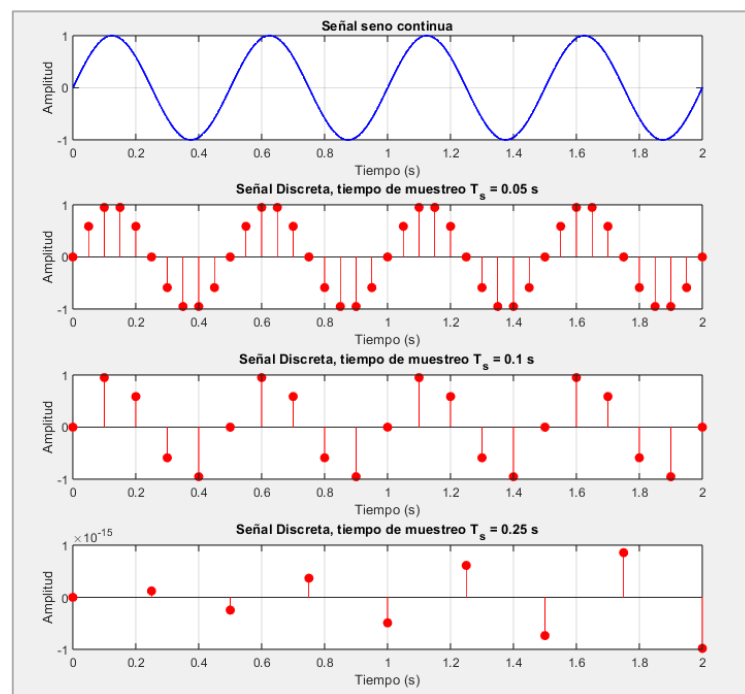


Figura 1.3 Pérdida de información debido a una mala selección del tiempo de muestreo
(Autor propio, 2025)

1.3.5.4 RETARDO DE SEÑALES

Es el tiempo que existe entre el momento en el que se aplica o se genera una señal, hasta que se puede ver su efecto. Este fenómeno es muy común en los sistemas eléctricos y electrónicos, donde las causas pueden ser limitaciones físicas de los equipos, retardo en el procesamiento de señales, largo de los conductores, etc.

1.3.5.5 APROXIMACIÓN DE PADÉ

La aproximación de Padé es una técnica matemática que representa funciones de transferencia mediante una función racional, definida como el cociente de dos polinomios, preservando las características esenciales de la respuesta del sistema. Esta aproximación no se limita a modelar retardos, sino que se aplica a diversas funciones analíticas para obtener representaciones simplificadas y precisas. En software como MATLAB, la aproximación de Padé se implementa internamente para aproximar retardos en sistemas dinámicos, representándolos como fracciones racionales que facilitan el análisis y diseño de sistemas de control, por ejemplo en la herramienta de MATLAB Sisotool (Entorno gráfico Interactivo diseñado para el análisis y diseño de sistemas de control de una entrada y una salida) se utiliza esta aproximación para representar retardos al diseñar controladores para funciones de transferencia que los presentan.

1.3.5.6 FILTRADO DE SEÑALES

Es una parte fundamental del procesamiento de señales, clasifica partes de los datos o señales como ruido y así mejora la calidad de la señal o información. Dentro de MATLAB existen distintas alternativas para filtrar señales, muchas de estas pueden ser aplicadas en distintas partes del modelo o de la experimentación. (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016)

1.3.6 INSTRUMENTACIÓN E INTERFACES DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La instrumentación hace referencia al estudio, diseño y selección de todos los dispositivos que permiten medir y supervisar diferentes variables, ya sea de temperatura, caudal o presión, en un sistema o proceso. En el campo de la instrumentación se utilizan diferentes herramientas, como sensores, transmisores, acondicionadores de señal y actuadores, los cuales se integran en sistemas de control y supervisión. Esto es de gran importancia, ya que permite que los proyectos funcionen de manera segura y correcta. Estos datos que se leen a través de sensores tienen que estandarizados por lo que se requiere una interfaz de adquisición de datos para realizar este proceso.

La Interfaz de adquisición de datos es una herramienta que permite capturar señales analógicas del entorno físico para poder transformarlas en datos digitales, los

cuales pueden ser interpretados por un sistema de control. Estas interfaces pueden integrarse con tarjetas de adquisición de datos (como la tarjeta LabJack U3) o también a través de microcontroladores como la ESP32 o un Arduino. Estas interfaces son de gran importancia, ya que permiten el análisis de datos en tiempo real. Luego, estos datos adquiridos se pueden trabajar utilizando herramientas como Matlab y Simulink, que permiten realizar simulaciones o diseñar sistemas.

1.3.6.1 SENSORES, TRANSMISORES, ACTUADORES Y FUENTES DE ALIMENTACIÓN

- **Sensores:** La principal función de este tipo de dispositivos es detectar una magnitud física o química presente en un proceso. Captan información de elementos como la temperatura, la presión y el caudal. Estos convierten la información física o química en señales eléctricas, ya sean analógicas o digitales, las cuales pueden ser interpretadas por diferentes dispositivos.
- **Transmisores:** Estos dispositivos se encargan de amplificar, convertir y estandarizar la señal que entrega un sensor. La señal estándar permite que ocurra una transmisión segura y confiable a largas distancias. Estas pueden ser señales analógicas (4-20 mA, 0-10 V) y señales digitales, como los diferentes protocolos de comunicación: HART, Modbus, Profibus.
- **Actuadores:** Son dispositivos que se encargan de ejecutar una acción física dentro del sistema o del proceso. Reciben las órdenes eléctricas o neumáticas y los convierten decisiones que modifican directamente al comportamiento del proceso.
- **Fuente de alimentación:** Es un dispositivo el cual sirve para proveer voltaje alterno o continuo para alimentar los equipos eléctricos y electrónicos de un sistema.

1.3.6.2 PWM Y DUTY CYCLE

El significado de las siglas de PWM es: Pulse width modulation (Modulación por ancho de pulso). Esta técnica sirve para enviar información o también modificar o controlar la cantidad de energía que se manda a una carga mediante la variación del ancho de pulso de una señal. Tiene múltiples usos en la electrónica, como el control de la velocidad de los motores, la luminosidad de un diodo led, la generación de señales de audio. Ahora bien, el ciclo de trabajo es la relación existente entre el tiempo en que una señal se encuentra encendida, es decir el ancho de la parte positiva con relación a su

periodo. Está expresado en porcentaje. La Ecuación 1.2 es la forma comúnmente utilizada para calcularlo:

$$\text{Duty cycle} = \frac{t}{T} \quad (1.2)$$

Donde t es la parte positiva y T es el periodo.

1.3.6.3 INTERFACES DE ADQUISICIÓN CON MATLAB Y SIMULINK

MATLAB es una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito de la ingeniería, especialmente en áreas como el procesamiento de señales, el diseño de algoritmos y el control automático. Su versatilidad y potencia lo han convertido en un recurso esencial tanto en entornos académicos como industriales.

Dentro del entorno de MATLAB se encuentra Simulink, una plataforma integrada que permite diseñar, simular y analizar sistemas dinámicos a través de diagramas de bloques. Gracias a su interfaz gráfica, es posible construir modelos de control y procesamiento de señales utilizando bloques que representan funciones matemáticas, sensores, actuadores y otros componentes del sistema.

Para trabajar con señales del mundo real, MATLAB también permite la adquisición de datos a través de comunicación serial, una técnica común y eficaz para conectar dispositivos físicos al computador. Esta comunicación puede implementarse tanto mediante bloques gráficos en Simulink como mediante programación directa en el entorno de MATLAB.

Entre los dispositivos más utilizados para este tipo de tareas se encuentran los microcontroladores como Arduino o ESP32, los cuales permiten capturar datos desde sensores o controlar actuadores. Asimismo, existen interfaces especializadas como la tarjeta LabJack U3-LV, diseñada específicamente para aplicaciones de adquisición de datos.

Estos dispositivos se conectan directamente al computador desde el cual se ejecuta MATLAB, y luego pueden ser programados o configurados según las necesidades del proyecto.

CAPÍTULO 2

2.1 METODOLOGÍA

Antes de iniciar el proyecto, se elaboró un cronograma de actividades con el propósito de dar seguimiento al cumplimiento de los objetivos y tareas planificadas. Este cronograma, presentado en el APÉNDICE A: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES, muestra el tiempo destinado a cada actividad y fue actualizado conforme avanzaba el desarrollo del proyecto.

2.1.1 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE COMPONENTES INSTALADOS

Se registró el estado de los componentes antes de la intervención, realizando una evaluación detallada de las conexiones y los componentes que se encontraban instalados antes de realizar la modernización de la estación didáctica, detallándolas en un informe entregado al cliente. En esta sección se comenta las observaciones más importantes del informe entregado. La Figura 2.1 muestra el estado en el que se recibieron los tomacorrientes, se aprecia uno en mal estado.



Figura 2.1 Estado de los tomacorrientes (Autor propio, 2025)

Tras verificar la alimentación de los dispositivos, se encontró que un tomacorriente no proporcionaba el voltaje adecuado, evitando el encendido de la bomba peristáltica 2.

A su vez, se evidenció una deficiente optimización del espacio en el tablero, ya que una fuente de 24 V ocupaba la totalidad del segundo riel DIN, dificultando la correcta organización del resto de los componentes. En la Figura 2.2, se observa el estado en el que el tablero se encontraba, podemos notar que los cables en su mayoría eran de color azul y no seguían alguna norma o convención.



Figura 2.2 Estado del tablero eléctrico previo al desarrollo del proyecto (Autor propio, 2025)

A pesar del de las condiciones de las conexiones, se logró verificar el correcto funcionamiento de los agitadores, los selectores del tablero eléctrico y las luces piloto. En términos generales, el cableado inicial presentaba deficiencias, ya que varios terminales se encontraban flojos y mal engrapados. Además, la ubicación del transformador, la fuente y un módulo de entradas en la parte central del tablero dificultaba una distribución ordenada de los componentes. El cliente nos facilitó un diagrama eléctrico en AutoCAD para ayudarnos en las labores de verificación de componentes, sin embargo, éste mostraba un diseño desordenado y con escasa claridad de las conexiones, por lo que se procedió a su rediseño con el fin de mejorar su comprensión y utilidad para las intervenciones planificadas. En la Figura 2.3 se observa el diagrama que fue entregado por el cliente con las conexiones eléctricas de la planta.

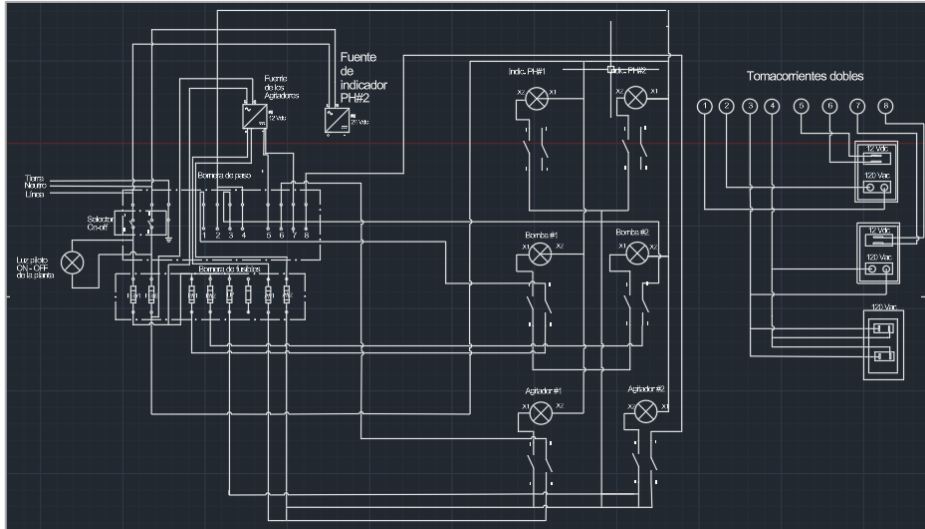


Figura 2.3 Diagrama eléctrico recibido (Autor propio, 2025)

2.1.2 RECABLEADO Y ADECUACIÓN DEL TABLERO PARA LA MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA

Realizado el levantamiento de información y evaluación inicial de los elementos instalados, se dio inicio al proceso de cableado del tablero eléctrico. Para ello, se siguieron los lineamientos establecidos en la norma IEC 60446, la cual define el código de colores para la identificación de conductores eléctricos. En este proyecto se emplearon las siguientes designaciones: rojo para la fase positiva en corriente continua (24 VDC), negro para la fase negativa en corriente continua, gris para la fase de corriente alterna (120 VAC), amarillo para la fase de 24 VAC y azul para el conductor neutro. Con un amperímetro se midió la corriente consumida de los elementos instalados para dimensionar los cables, esta corriente no superaba los 4 amperios. Por lo que se decidió utilizar conductores flexibles de calibre 18 AWG, el cual tiene una capacidad de 10 amperios.

En la Figura 2.5 se deja en constancia como se dejó el tablero luego de la intervención realizada con el objetivo de liberar el mayor espacio posible para la instalación de la tarjeta de adquisición de datos, los módulos y demás componentes requeridos en el proceso de actualización del sistema.



Figura 2.4 Tablero eléctrico recableado luego del levantamiento inicial (Autor propio, 2025)

2.1.3 ELABORACIÓN DE DIAGRAMA ELÉCTRICO Y P&ID

El cliente proporcionó la lista de elementos adquiridos para la modernización. Con base en sus requerimientos, se elaboró el diagrama mostrado en la Figura 2.5 con el fin de identificar las características principales de cada componente y su función dentro de la estación didáctica.

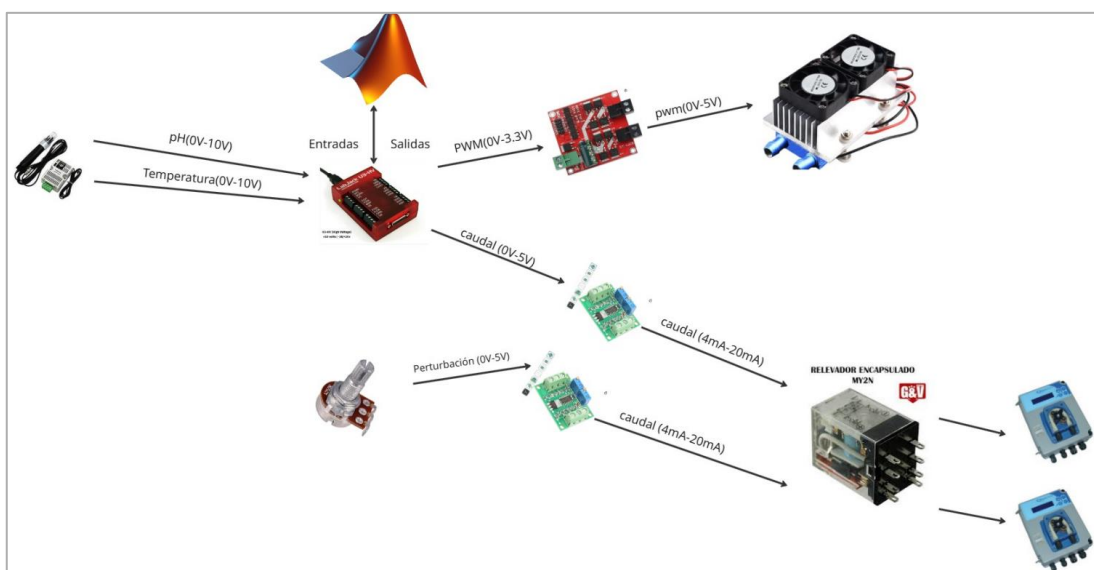


Figura 2.5 Diagrama de bloques de los sensores y actuadores (Autor propio, 2025)

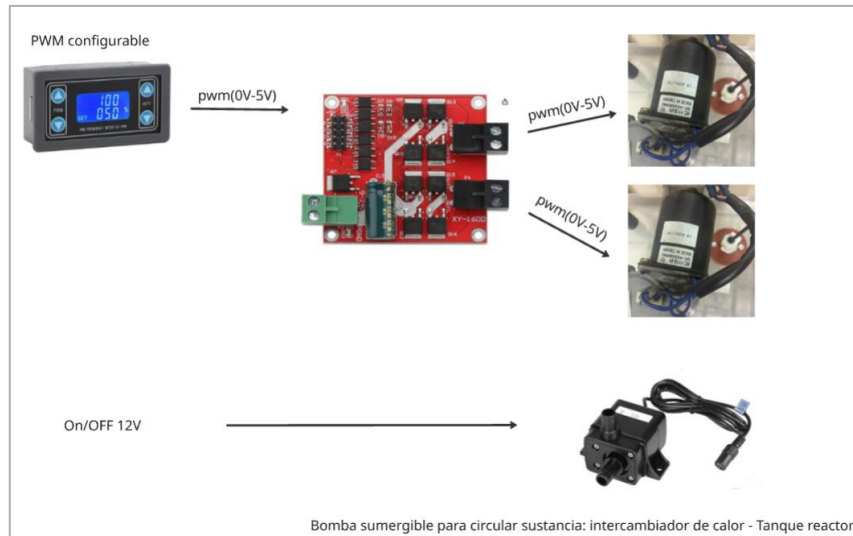


Figura 2.6 Dispositivos controlados de forma manual (Autor propio, 2025)

Los elementos del diagrama anterior son controlados de forma manual (Figura 2.6), conforme a lo requerido por el cliente.

Una vez establecido lo anterior, se elaboró el diagrama eléctrico correspondiente a los circuitos de potencia y control, desarrollado en el software AutoCAD e incluyendo las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del tablero. Véase en el APÉNDICE B: DIAGRAMA ELÉCTRICO.

Luego se procedió a desarrollar un diagrama P&ID en el mismo software para representar de forma clara y ordenada el conexionado de las válvulas y tuberías de la estación didáctica. Véase en el APÉNDICE C: DIAGRAMA P&ID.

2.1.4 FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS COMPONENTES

A continuación, se describe la función de cada dispositivo en la estación didáctica, en concordancia con los objetivos de su modernización. Se detalla su rol en la adquisición de datos, control de señales y operación de los actuadores.

- **Transmisor de pH y temperatura (0–10 V):** El transmisor de pH y temperatura convierte las señales de los sensores en voltajes analógicos estándar (0–10 V). Posee dos entradas: una para pH y otra para temperatura, cuyas salidas se conectan

a las entradas HV de la tarjeta de adquisición LabJack U3-HV. Se alimenta mediante una fuente de 12 V ubicada en la parte posterior de la estación. En la Figura 2.7 se presentan las curvas de respuesta obtenidas del datasheet, que permiten comprender la transferencia de señal de cada variable.

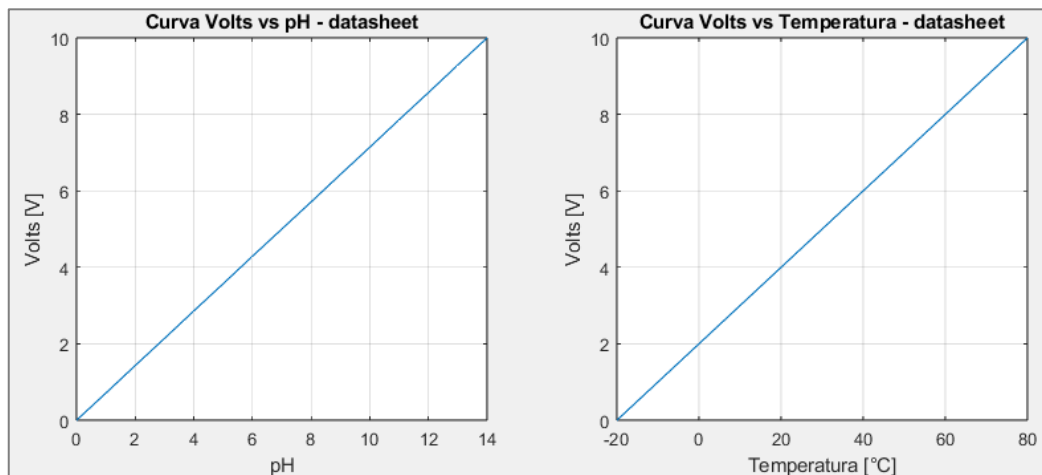


Figura 2.7 Curva de Transferencia del Transmisor de pH y Temperatura (Autor propio, 2025)

- **LabJack U3-HV (Módulo de adquisición de datos):** El LabJack U3-HV recibe las señales analógicas de los sensores y envía señales de control a los actuadores. Sus salidas analógicas (0–5 V, DAC0 y DAC1) se emplearon para controlar principalmente el caudal de las bombas peristálticas mediante DAC1. Además, dispone de salidas digitales configurables como PWM (0–3.3 V); en este proyecto, la salida FIO4 se configuró para accionar el controlador XY-160D y regular las celdas Peltier. La conexión con la computadora se realizó vía USB, integrándose en MATLAB y Simulink, lo que permitió la programación y supervisión del sistema. Finalmente, las entradas analógicas AIN0 y AIN1 se utilizaron para la lectura de las señales de pH y temperatura, respectivamente.
- **Convertidores de Voltaje a Corriente (0-5V a 4-20 mA):** Estos módulos transforman la señal de voltaje (0–5 V) en corriente estándar (4–20 mA), requerida por las bombas peristálticas. Se emplearon dos convertidores: uno conectado a la salida DAC1 del LabJack para controlar la primera bomba, y otro conectado a un potenciómetro, que permitió el control manual de la segunda bomba. Esta configuración garantizó que las

bombas operaran correctamente bajo control de corriente, manteniendo la precisión en el caudal suministrado al reactor.

- **Potenciómetro de Perturbación (0–5 V):** El potenciómetro suministra una señal de voltaje al convertidor a corriente de la segunda bomba peristáltica, permitiendo un control manual de la perturbación acorde al requerimiento del cliente. Esto facilita ajustes rápidos y pruebas de perturbación sin depender del control automático de MATLAB.
- **Relé RXM2AB2F7:** Este relé de 8 pines se empleó para intercambiar las señales de control entre las bombas peristálticas, permitiendo seleccionar cuál bomba se controla desde MATLAB y cuál mediante el potenciómetro.
- **Bombas Peristálticas (Actuadores 4–20 mA):** Las bombas impulsan las soluciones ácida y básica hacia el tanque reactor, donde ocurre el proceso de neutralización. Su control se realiza mediante señales estándar de 4–20 mA, mientras que la alimentación eléctrica corresponde a 120 V AC.
- **Driver XY-160D:** El controlador XY-160D recibe señales de control de bajo voltaje (PWM 0–3.3 V) y genera señales de potencia para los actuadores. En la estación didáctica se emplearon dos módulos: uno para las celdas Peltier y otro para los agitadores. Cada módulo puede controlar hasta dos dispositivos de manera independiente.
- **Celda Peltier (TEC1-12706) con Disipador y Ventiladores:** La celda Peltier regula la temperatura del tanque, permitiendo evaluar su efecto sobre el pH. Los disipadores y ventiladores contribuyen a mantener la estabilidad térmica del sistema. La corriente que circula por la celda es regulada por el controlador XY-160D.
- **Motores 12V (Agitadores):** Los dos motores instalados en la estación didáctica homogenizan las sustancias presentes en los tanques, optimizando el tiempo de reacción y permitiendo aproximar algunas reacciones como instantáneas. Su control se realiza mediante señales PWM generadas por el controlador XY-160D, que también suministra la alimentación eléctrica necesaria.

2.1.5 SUSTANCIAS ADQUIRIDAS Y PREPARACIÓN PARA EL EXPERIMENTO

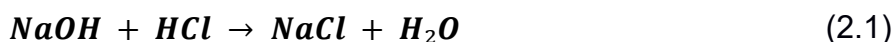
2.1.5.1 REACTIVOS ADQUIRIDOS

Se gestionó la adquisición de 100mL de 2 reactivos de alta concentración (20%) para el proceso, ácido sulfúrico y cloruro de sodio, un ácido y base fuertes que se utilizaron como sustancias madres, de las que, a partir de su dilución, se obtuvo sustancia una concentración para su manipulación segura con las que después se desarrolló el modelo del reactor. Para conocer su concentración real en mol/L se valoraron los reactivos adquiridos mediante el proceso de titulación ácido–base, para conocer la concentración real.

La titulación consiste en reaccionar una disolución de concentración conocida (reactivo titulante) con otra de concentración desconocida (disolución problema), utilizando fenolftaleína como indicador, que cambia de incoloro a violeta en el punto de equivalencia.

2.1.5.2 TITULACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO

La valoración de la solución de hidróxido de sodio (NaOH) se efectuó con ácido clorhídrico (HCl) 0.1 mol/L como titulante. La reacción de neutralización (Ecuación 2.1) es:



La relación molar es 1:1, es decir, 1 mol de NaOH reacciona con 1 mol de HCl. Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Volumen de HCl = 70 mL = 0.07 L

Volumen de NaOH = 5 mL = 0.005 L

Concentración de HCl = 0.1 mol/L

Se calculan los moles de HCl con la Ecuación 2.2:

$$\text{moles de HCl} = \text{Concentración de HCl} \cdot \text{Volumen de HCl} \quad (2.2)$$

$$n_{\text{HCl}} = C_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}}$$

$$n_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L} \cdot 0.07 \text{ L}$$

$$n_{\text{HCl}} = 0.007 \text{ mol}$$

Dado que la estequiometría es 1:1, la equivalencia que tenemos es:

$$0.007 \text{ mol HCl} \cdot \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol HCl}} = 0.007 \text{ mol NaOH}$$

La concentración de la disolución de NaOH se obtiene aplicando la Ecuación 2.3:

$$\text{Concentración de NaOH} = \frac{\text{moles de NaOH}}{\text{Volumen de NaOH}} \quad (2.3)$$

$$C_{\text{NaOH}} = n_{\text{NaOH}} / V_{\text{NaOH}}$$

$$C_{\text{NaOH}} = 1.4 \text{ mol/L}$$

2.1.5.3 DILUCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO

Por lo tanto, la solución madre de NaOH tiene una concentración de 1.4 mol/L. Para obtener una solución diluida de 0.001 mol/L en un volumen de 3 L, se aplica la Ecuación 2.4 de dilución:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (2.4)$$

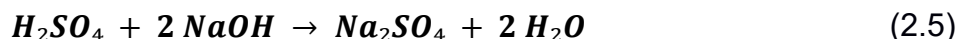
$$1.4 \cdot V_1 = 0.001 \cdot 3$$

$$V_1 = 0.00214 \text{ L} = 2.14 \text{ mL}$$

De esta manera, se midieron 2.14 mL de la solución madre de NaOH y se diluyeron en 3 litros de agua destilada para obtener la concentración deseada.

2.1.5.4 TITULACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO

Posteriormente, se repitió el procedimiento con la solución madre de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Para ello, se empleó la solución valorada de NaOH como base y el mismo indicador. Se tomaron 5 mL de NaOH y se titularon con H_2SO_4 , requiriendo 3.2 mL de ácido para que la disolución pasara de incolora a morado. La reacción de neutralización (Ecuación 2.5) es:



En este caso, la relación molar es 1:2, es decir, 1 mol de H_2SO_4 reacciona con 2 mol de NaOH.

$$Volumen\ de\ H_2SO_4 = 3.2\ mL = 0.0032\ L$$

$$Volumen\ de\ NaOH = 5\ mL = 0.005\ L$$

$$Concentración\ de\ NaOH = 1.4\ mol/L$$

Se calculan los moles de NaOH (Ecuación 2.6):

$$moles\ de\ NaOH = Concentración\ de\ NaOH * Volumen\ de\ NaOH \quad (2.6)$$

$$nNaOH = C\ NaOH \cdot V\ NaOH$$

$$nNaOH = 1.4\ mol/L \cdot 0.005\ L$$

$$nNaOH = 0.007\ mol$$

Por la estequiometría, los moles de H_2SO_4 son:

$$nH_2SO_4 = 0.007\ mol \cdot (1\ mol\ H_2SO_4 / 2\ mol\ NaOH) = 0.0035\ mol$$

Con estos valores se calcula la concentración del ácido (Ecuación 2.7):

$$Concentración\ de\ H_2SO_4 = \frac{moles\ de\ H_2SO_4}{Volumen\ de\ H_2SO_4} \quad (2.7)$$

$$C\ H_2SO_4 = n\ H_2SO_4 / V\ H_2SO_4$$

$$C_{H_2SO_4} = 0.0035 \text{ mol} / 0.0032 \text{ L}$$

$$C_{H_2SO_4} \approx 1.1 \text{ mol/L}$$

2.1.5.5 DILUCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO

De esta manera, la solución madre de H_2SO_4 tiene una concentración aproximada de 1.1 mol/L. Para preparar una disolución de 0.001 mol/L en 3 L, se aplica la ecuación de dilución:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$1.1 \cdot V_1 = 0.001 \cdot 3$$

$$V_1 = 0.00273 \text{ L} = 2.73 \text{ mL}$$

Así, se deben medir 2.73 mL de la solución madre de H_2SO_4 y diluirlos en 3 litros de agua para obtener la concentración deseada.

En conclusión, a partir de la titulación se determinó que la solución madre de NaOH tiene una concentración de 1.4 mol/L, mientras que la de H_2SO_4 es de 1.1 mol/L. Para preparar soluciones de 0.001 mol/L en un volumen de 3 litros, se requieren 2.14 mL de la solución madre de NaOH y 2.73 mL de la solución madre de H_2SO_4 , completando con agua hasta alcanzar el volumen final.

2.1.6 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA

2.1.6.1 LABJACK U3-HV

Se realizaron pruebas a las salidas digitales configuradas como PWM, a los DACs y a las entradas analógicas del dispositivo LabJack U3-HV, con el propósito de verificar su correcto funcionamiento y analizar las diferentes formas de programarlo desde la computadora, que es la encargada de enviar las instrucciones a la interfaz.

Las primeras pruebas se realizaron con el software LJControlPanel, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición. Posteriormente se procedió a crear programas para leer o escribir salidas desde MATLAB, la Figura 2.8 es una recopilación de capturas de un vídeo donde se probó configurar una salida digital como PWM:

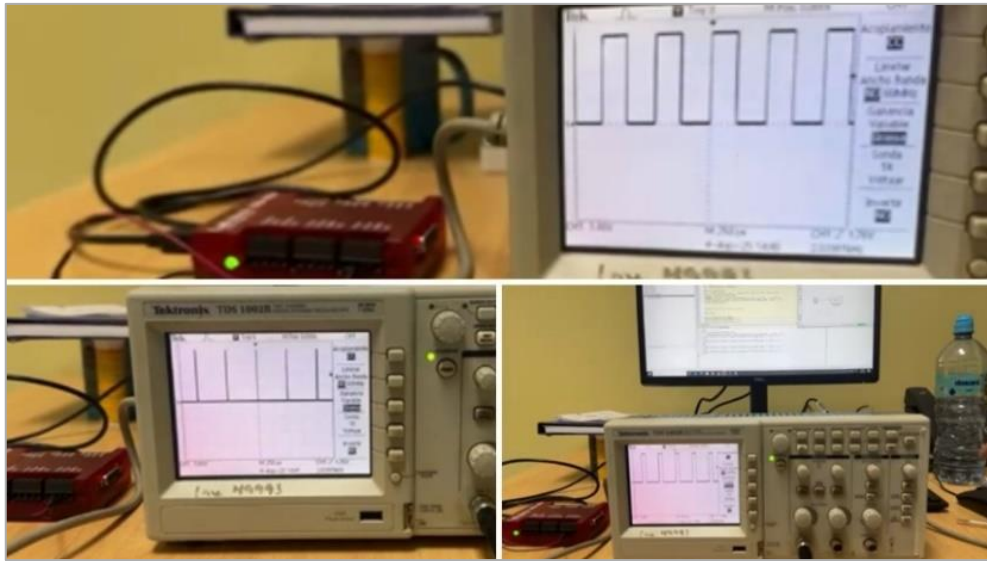


Figura 2.8 Control de PWM a través de código en MATLAB (Autor propio, 2025)

2.1.6.2 BOMBAS PERISTÁLTICAS

El modelo de instalado de la marca Seko, presenta un retardo en su acción de 4.12 segundos; una vez que la señal de control (4-20mA) varía, el cambio en el caudal de salida ocurre luego de este tiempo.



Figura 2.9 Retardo de la acción de las bombas (Autor propio, 2025)

En la Figura 2.9 se muestra cómo se determinó desde una aplicación de video el retardo en la acción de las bombas peristálticas.

Además, cuando las bombas actúan, estas no llegan al valor de referencia de forma instantánea, En un trabajo previo, se modeló el cambio en el caudal de salida (mL/min) mediante una función de transferencia (Ecuación 2.8), cuya variable de entrada corresponde al cambio en la señal de referencia expresada en mA (Ramos, 2012).

$$F.T. Bombas P.(S) = \frac{10875.00}{0.4s + 1} \quad (2.8)$$

En el mismo estudio, se realizó la linealización del cambio de pH a partir del caudal en mL/min para valores de pH entre 2 y 12, obteniéndose el siguiente modelo (Ecuación 2.7) (Ramos, 2012):

$$F.T. \Delta pH(S) = \frac{0.0147}{73.52s + 1} \quad (2.7)$$

Con estos modelos, se realizó una prueba de la Función de transferencia variando la corriente del 20 al 25% considerando un caudal inicial de 21,8mL/min para comprobar el modelo de acción de la bomba y revisar la utilidad de este material para el desarrollo del proyecto.

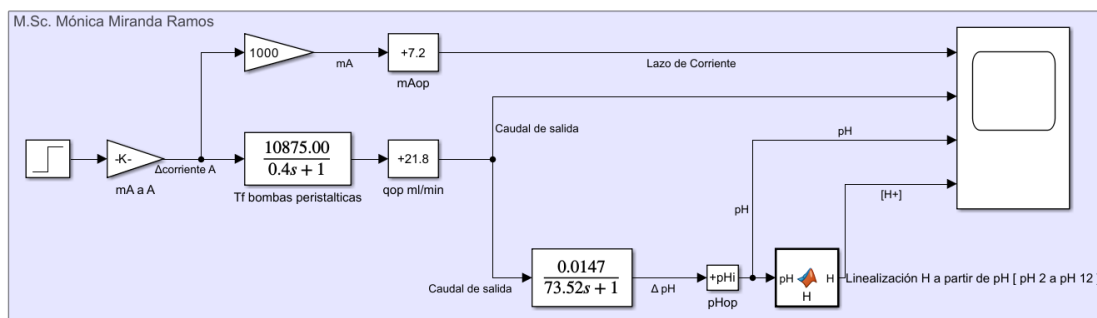


Figura 2.10 Diagrama en Simulink – FT de las bombas peristálticas (Autor propio, 2025)

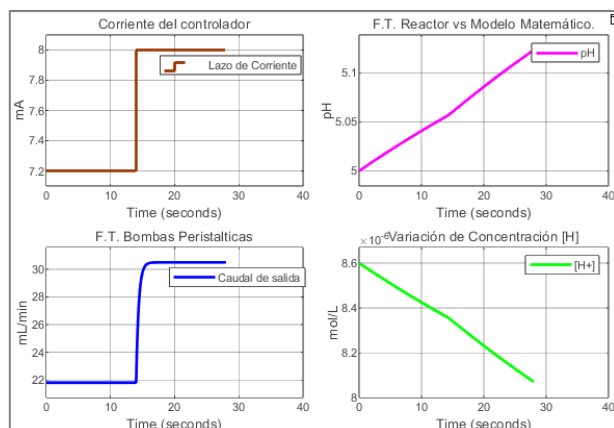


Figura 2.11 Resultado de la prueba de la FT de las bombas peristálticas (Autor propio, 2025)

Como se aprecia en las Figuras 2.10 y 2.11, se muestra la acción de la bomba en al alcanzar el setpoint y como genera pequeños cambios en el pH.

En el mismo documento donde se encuentra la FT de las bombas, registra que ambas poseen un caudal máximo de 122mL/min (Ramos, 2012). Se procedió a verificar ese dato utilizando la función de calibración de las bombas. Antes de realizar la calibración, la bomba debe estar cebada. El caudal máximo determinado de la Bomba 1 fue de 131mL/min, el de la Bomba 2 de 100mL/min.

Se realizó un análisis comparativo entre la Función de Transferencia (FT) de las bombas peristálticas, determinada por Miranda Ramos en 2012, y los datos actuales, con el propósito de evaluar la evolución de su comportamiento.

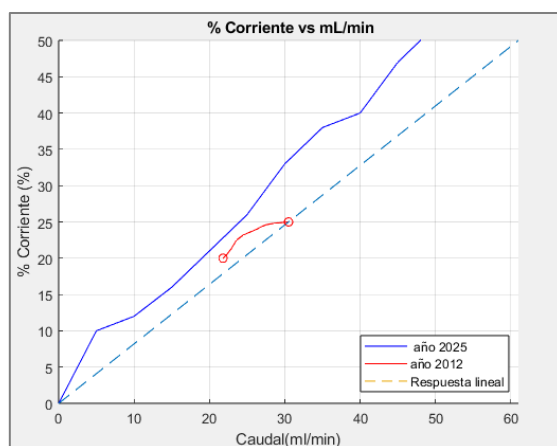


Figura 2.12 Representación de los datos obtenidos (Autor propio, 2025)

En la Figura 2.12 se observa la comparación entre los datos obtenidos en el 2012, los obtenidos en el ensayo realizado y como referencia una respuesta lineal, representando la correspondencia entre el porcentaje de corriente (4-20mA) y el caudal de la válvula en ml/min. Este experimento se realizó aumentando la corriente en intervalos de 5% y tomando nota del volumen obtenido luego de un minuto.

2.1.6.3 SENSOR DE PH Y TEMPERATURA

Se realizaron pruebas con el transmisor de temperatura y pH para verificar su funcionamiento y respuesta con la información del datasheet:



Figura 2.13 Lectura de la salida del transmisor de pH y Temperatura (Autor propio, 2025)

En valor mostrado en la Figura 2.13 de 8.2 V corresponde a una temperatura de 62 °C, mientras que un voltaje de 4.49 V se asocia a un pH de 6.3 según el datasheet. Se observó que la respuesta del sistema frente a variaciones es prácticamente inmediata; es decir, ante un cambio en la temperatura o pH, la variación se refleja de manera simultánea en la señal de voltaje medida. Sin embargo, se constató que la lectura presenta variaciones a pesar de que el medio se mantiene constante.

2.1.6.4 LABJACK Y SIMULINK

Se desarrolló un bloque MATLAB System como interfaz entre MATLAB y el LabJack, permitiendo la lectura de señales y configuración de las salidas. Como parámetros configurables del bloque se programaron el número de entrada o salida a utilizar y el tiempo de muestreo, en la Figura 2.14 se detallan.

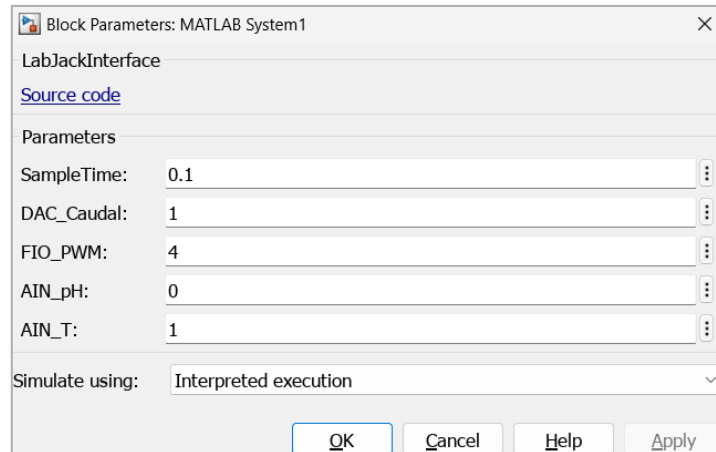


Figura 2.14 Parámetros del Bloque LabJackInterface (Autor propio, 2025)

La entrada Caudal_V recibe un valor entre 0 y 5 que luego de ejecutado el bloque, define el voltaje del DAC previamente especificado en los parámetros. La entrada dutyCycle, recibe un valor entre 0 y 100 para controlar el ciclo de trabajo del PWM en la FIO seleccionada. Las salidas del bloque proporcionan valores entre 0 y 10, que se pueden escalar con una ganancia para llevarlos a los rangos de 0 a 14 para pH y -20 a 80 °C para temperatura (Figura 2.15).

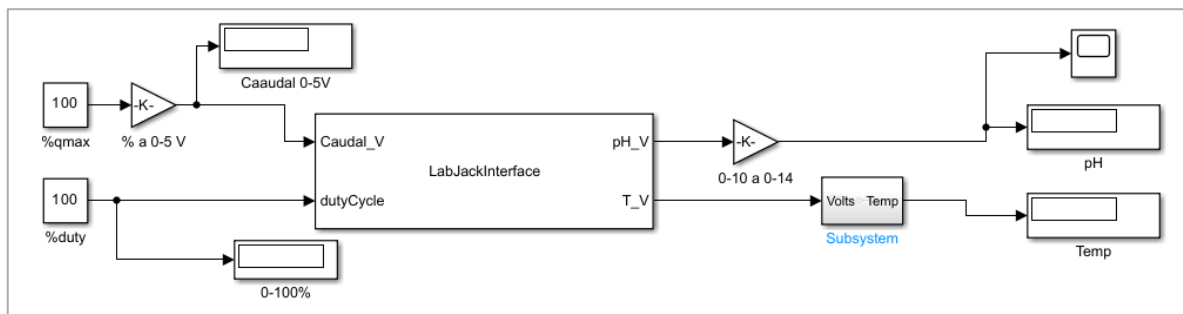


Figura 2.15 Diagrama de la interfaz Simulink–LabJack mostrando las entradas y salidas escaladas. (Autor propio, 2025)

Con este modelo de Simulink se realizó una prueba de las lecturas de temperatura y pH del sensor. La información mostrada en la Figura 2.16 corresponde a la de una taza de café en reposo:

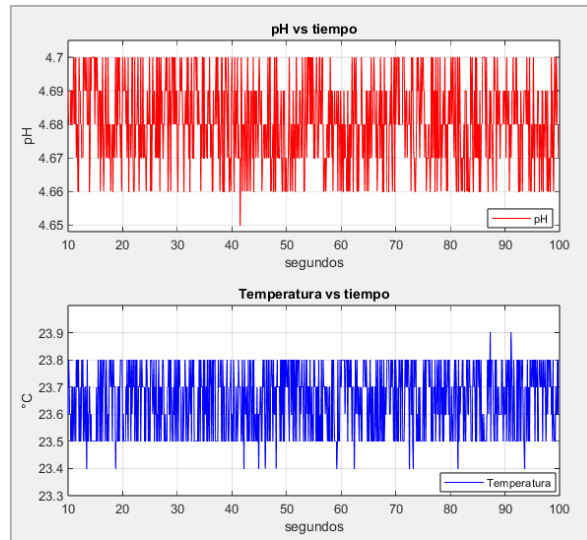


Figura 2.16 Respuesta en estado estable de los sensores visualizada en MATLAB (Autor propio, 2025)

2.1.6.5 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Este sistema está compuesto por el disipador donde están instaladas las celdas peltier y una bomba sumergible, unidos por mangueras de 1/8" que mueve líquido desde el tanque hacia el disipador, en donde se extrae o añade calor de forma continua.

Se realizó experimentos para visualizar la capacidad de enfriar y calentar el líquido de este subsistema con un volumen de 3.2L de café, que corresponde con la altura a la que el líquido llega a la sonda de pH. Las siguientes gráficas muestran la información obtenida de dichos experimentos.

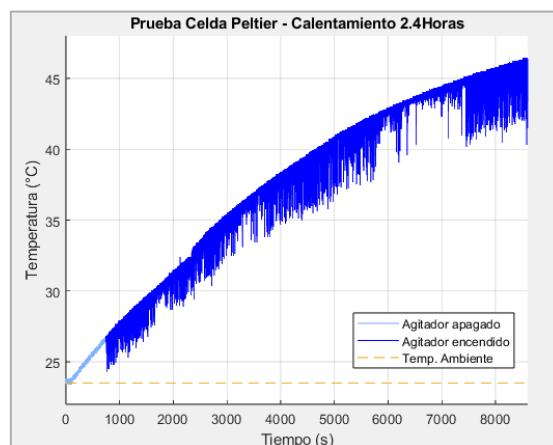


Figura 2.17 Celdas Peltier calentando -3.2L (Autor propio, 2025)

Como se puede apreciar en la Figura 2.17, cuando se enciende el agitador, la lectura presente un ruido significativo. Después de este experimento, se usó las celdas peltier para enfriar el líquido ya caliente, se mantuvo apagado el agitador del tanque para corroborar el ruido generado por este elemento (Figura 2.18).

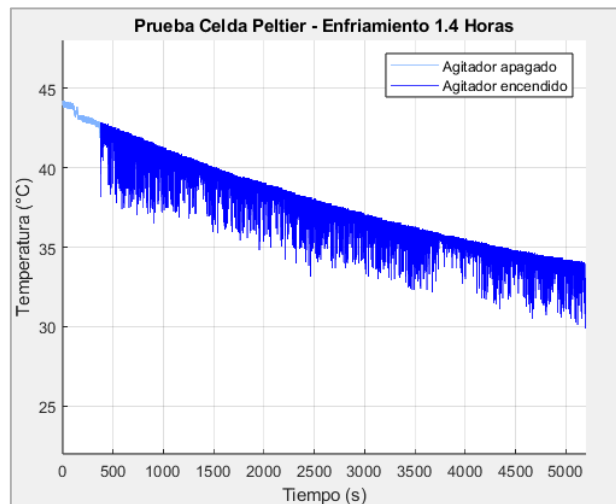


Figura 2.18 Celdas Peltier enfriando – 3.2L (Autor propio, 2025)

Se observó el ruido generado por el agitador y como después de aproximadamente 1.5H el volumen disminuyó su temperatura en 15 grados. Luego se repitió el experimento, pero a temperatura ambiente. Sin embargo, en esta ocasión, a pesar de que se verificó que estaba funcionando el intercambiador, no se observó que el volumen del líquido se enfrió (Figura 2.19).

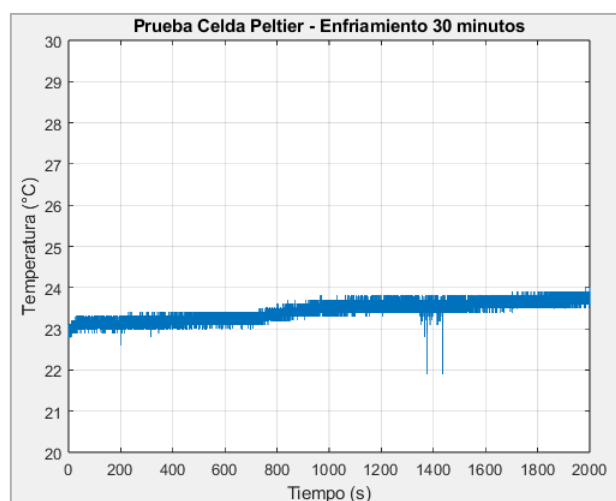


Figura 2.19 Celdas Peltier enfriando – 3.2L (Autor propio, 2025)

2.1.6.6 PRUEBA DE NEUTRALIZACIÓN CON LAS SUSTANCIAS DILUIDAS

Se realizaron tres pruebas utilizando las soluciones diluidas (concentración de 0,001 mol/L), con el fin de evaluar la variación del pH. El pH inicial de la base diluida fue 12, mientras que el del ácido diluido fue 1,5. Se estableció un volumen inicial de ácido en cada prueba, sobre los cuales se incrementó gradualmente el volumen de base utilizando jeringas como se puede apreciar en la Figura 2.20.



Figura 2.20 Ensayo con sustancias diluidas (Autor propio, 2025)

Este procedimiento permitió determinar experimentalmente la relación estequiométrica en la que las sustancias se neutralizan, es decir, forman una mezcla de ácido cercano a 7. Se necesitan 1.9 unidades de base para neutralizar 1 unidad de ácido, como se puede apreciar en la imagen que recopila los datos de los 3 ensayos.

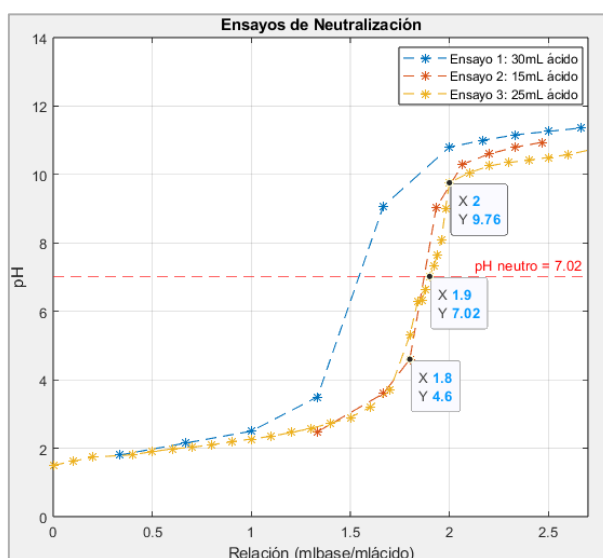


Figura 2.21 Ensayo con sustancias diluidas (Autor propio, 2025)

La relación observada en la Figura 2.21, resulta sensible con valores cercanos a 1.8 o 2 el pH tiende a desviarse del punto de neutralidad. En volúmenes de líquido mayores, esta condición no es tan crítica debido al reducido caudal de las bombas peristálticas.

2.1.7 FILTRADO DE SEÑALES

2.1.7.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DEL FILTRO

Debido al ruido de alta frecuencia identificado en las señales de temperatura y pH en estado estable (Figura 2.29), que se intensifica al encender el agitador del tanque (Figura 2.30), se optó por aplicar un filtro pasa-bajo.

2.1.7.2 IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO

El filtro implementado para mejorar la visualización de la información es de tipo Butterworth de primer orden. Se realizó el filtrado de las señales usando los comandos “butter” y “filtfilt”. La frecuencia de corte (f_c) se determinó experimentalmente, buscando conservar la información relevante. A continuación, se presente un ejemplo aplicado sobre la información recolectada en la sección 1.6.1.5 de ejemplo:

$f_c = 0.01$; % Frecuencia de corte [Hz]

$[b,a] = \text{butter}(1, f_c/(10/2), 'low')$; % Filtro Butterworth de 1er orden

$pH_filtro_c = \text{filtfilt}(b,a,pH)$;

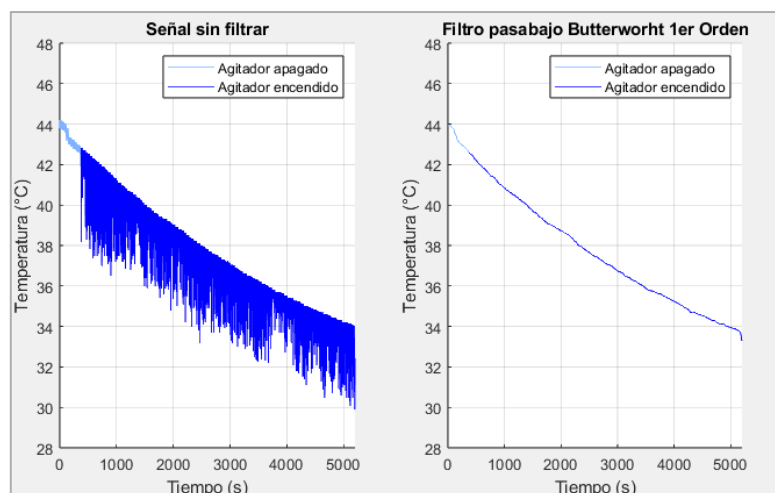


Figura 2.22 Comparación de data original vs data filtrada (Autor propio, 2025)

2.1.8 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

2.1.8.1 MODELO LINEALIZADO DEL REACTOR

Luego de revisar el comportamiento de cada componente, se desarrolló un modelo matemático del proceso de pH para realizar su control. En el trabajo de Miranda Ramos (2012), la función que permite ver el cambio de pH según la variación en mL/min, abarca un rango amplio de pH, de 2 a 12, sin embargo, debido a la no linealidad de la relación entre pH y concentración, no se consideró oportuno usar este modelo para desarrollar el controlador de pH en esta ocasión.

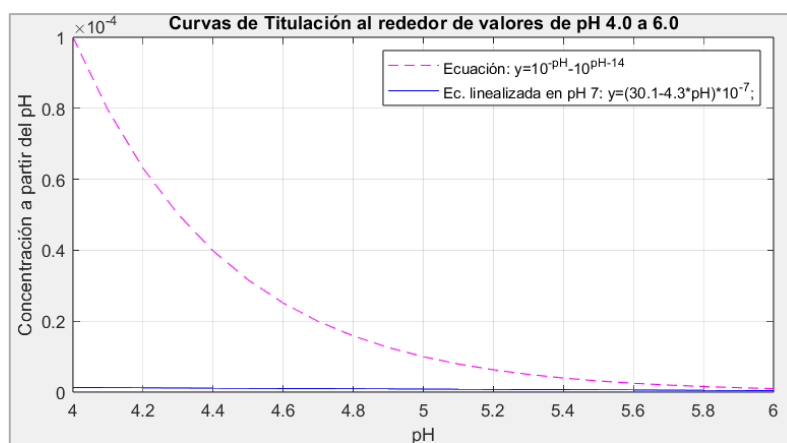


Figura 2.23 Relación Linealizada Miranda R. (2012) alrededor de un pH=5 (Autor propio, 2025)

La Figura 2.23 evidencia la diferencia entre la relación original no lineal y la aproximación lineal de Miranda R alrededor del punto de operación seleccionado para nuestro experimento

2.1.8.2 CONDICIONES INICIALES, ASUNCIONES Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo se desarrolló para determinar cambios en el pH a partir de variaciones en entradas de caudal que suministran sustancias ácidas y básicas al reactor. El modelo considera que existe un líquido con un volumen, pH y temperatura inicial en el tanque.

Se asume que las reacciones en el tanque ocurren de forma instantánea debido al agitador y a la bomba sumergible en el tanque. Se asume que debido a que el tanque

tiene una capacidad de 4.7L (antes de alcanzar el nivel del rebosado) y las entradas de caudal como máximo son de 131mL/min, no existe caudal de salida. El pH inicial se definió entre 4.5 y 4.8. Se consideró a la temperatura ambiente como inicial. Se asume que puede que todo el tiempo ingrese líquido por las bombas y se controla 1 a la vez mientras la otra funciona como perturbación.

2.1.8.3 MODELADO MATEMÁTICO DEL REACTOR, ECUACIONES LOGARÍTMICAS

Las ecuaciones no lineales del modelo del reactor relacionan la concentración de iones y el pH, tanto inicial, proveniente del volumen inicial en el tanque, como de salida, luego de considerar el ingreso de sustancia por medio de las bombas peristálticas. La concentración de iones a partir del pH inicial es descrita por las siguientes ecuaciones:

$$[H^+] = 10^{(-pH)} \quad (2.8)$$

$$[OH^-] = \frac{K_w}{[H^+]} \quad (2.9)$$

K_w es la constante de equilibrio para la reacción y depende de la temperatura. Su valor a 25°C es 10^{-14} y se puede estimar en función de la temperatura mediante la ecuación empírica propuesta por Marshall y Franck (1981):

$$K_w = 10^{\left(-4.098 - \frac{3245.2}{T} + \frac{2.2362 \cdot 10^5}{T^2} - \frac{3.984 \cdot 10^7}{T^3}\right)} \quad (2.10)$$

Donde T está en grados Kelvin.

Dependiendo del ion en exceso se debe usar una de las siguientes fórmulas para encontrar el pH:

$$pH = \log_{10}([H^+]) \quad (2.11)$$

$$pH = -\log_{10} \left(\frac{K_w}{[OH^-]} \right) \quad (2.12)$$

A partir de K_w se establece un valor neutro de pH y por consecuencia una concentración mínima de iones en las que independientemente de su tipo, el pH es neutro. Las saturaciones ubican al pH entre 0-14 y a su vez limitan el rango de pH neutro y ácido.

Se utilizó bloques de lógica para determinar si la concentración corresponde a un valor ácido o básico y así determinar el pH de salida, tomando siempre en cuenta el valor central de K_w , lo que hace que el modelo dependa de cierta forma de la temperatura. Las interacciones descritas anteriormente se pueden observar en la Figura 2.24.

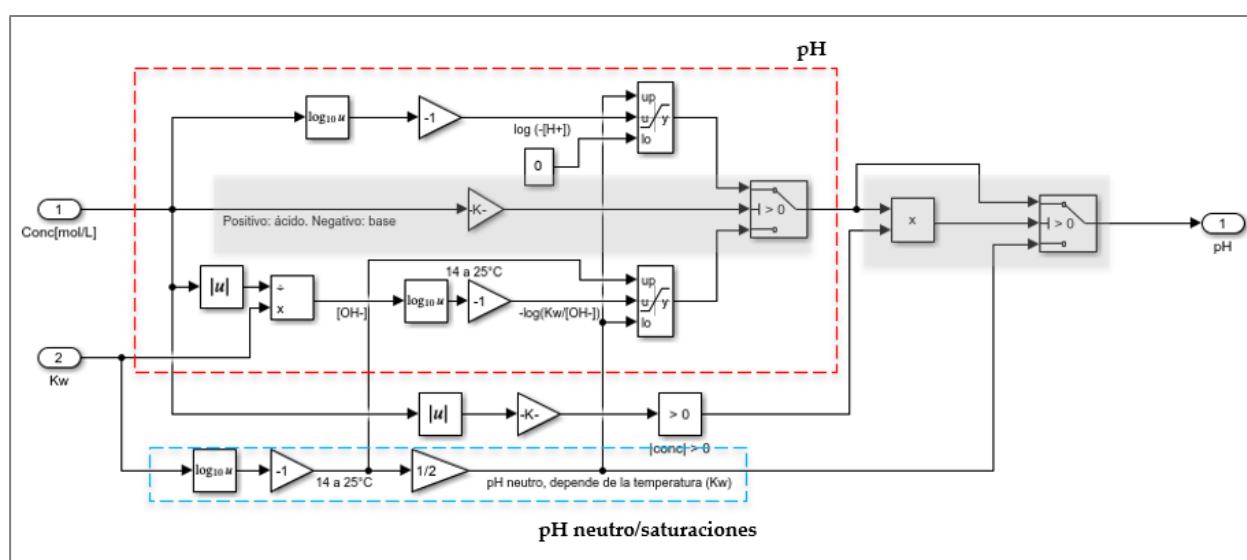


Figura 2.24 Ecuaciones no lineales del sistema representadas en Simulink (Autor propio, 2025)

2.1.8.4 MODELADO MATEMÁTICO DEL REACTOR, ECUACIONES CAUDAL-CONCENTRACIÓN

Al reactor ingresan sustancias de forma controlada que dependen del caudal de las bombas peristálticas. Puede considerarse un ingreso constante de sustancia ácida y básica al sistema, lo que cambia la concentración de los iones dentro del reactor. La función del agitador y la bomba sumergible es recircular el líquido en el tanque para que las reacciones ocurran de forma instantánea. La reacción principal que se lleva a cabo

en el reactor es la de neutralización, donde iones hidronio se juntan con iones oxidrilos para formar agua. El exceso de concentración de ion oxidrilo o ion hidronio (mol/L), es el que determina el pH, este valor de concentración que no se neutraliza es el que se ingresa a la parte no lineal del sistema para determinar el pH de salida.

A partir de las siguientes ecuaciones se determina la concentración de iones hidronio y oxidrilo que ingresan, dependiendo del caudal de las bombas.

$$\frac{d[H^+]}{dt} = qa * Ca \quad (2.13)$$

$$\frac{d[OH^-]}{dt} = qb * Cb \quad (2.14)$$

Donde qa (caudal de sustancia ácida) y qb (caudal de sustancia básica) están en L/s. Ca, Cb en mol/L. Al integrar esta expresión obtenemos la concentración que se acumula en el tanque en moles.

Para determinar qué cantidad de iones sobran luego de la neutralización es necesario primero añadir a los valores de concentraciones las concentraciones iniciales de los iones en mol. A partir del pH inicial se obtiene las concentraciones en mol/L y luego se lo multiplica por el volumen para obtener el número de moles de cada ion.

$$moles H^+ = \int_0^t (qa * Ca) dt + 10^{-pHi} * Vi \quad (2.15)$$

$$moles OH^- = \int_0^t (qb * Cb) dt + 10^{pHi-Kw} * Vi \quad (2.16)$$

Consideramos que la reacción de neutralización nos deja el número de los iones en exceso, al dividirlo por el volumen, obtenemos la concentración en mol/L:

$$r = \frac{moles H^+ - moles OH^-}{Vo} \quad (2.17)$$

Si r es positivo, el exceso es de iones hidronios caso contrario, el valor de r representa iones oxidrilos. El valor r ingresa a la parte no lineal del sistema para que se determine el valor del pH de salida con la lógica explicada en la sección anterior. Las interacciones descritas anteriormente se pueden observar en la Figura 2.25.

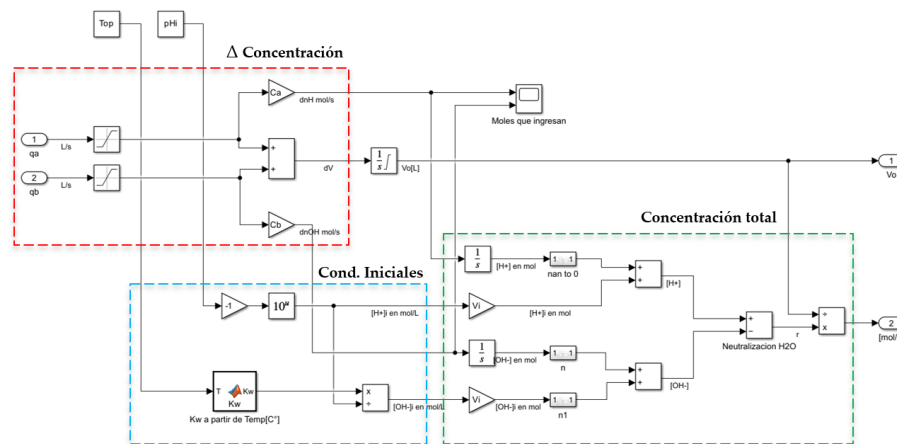


Figura 2.25 Ecuaciones lineales del sistema representadas en Simulink (Autor propio, 2025)

2.1.8.5 PRUEBAS DEL MODELO MATEMÁTICO

Se observó que el modelo desarrollado permite también obtener como salida la variación del volumen dentro del tanque. En la Figura 2.26 se presentan las respuestas de pH y volumen ante cambios aplicados en las entradas q_a y q_b del modelo.

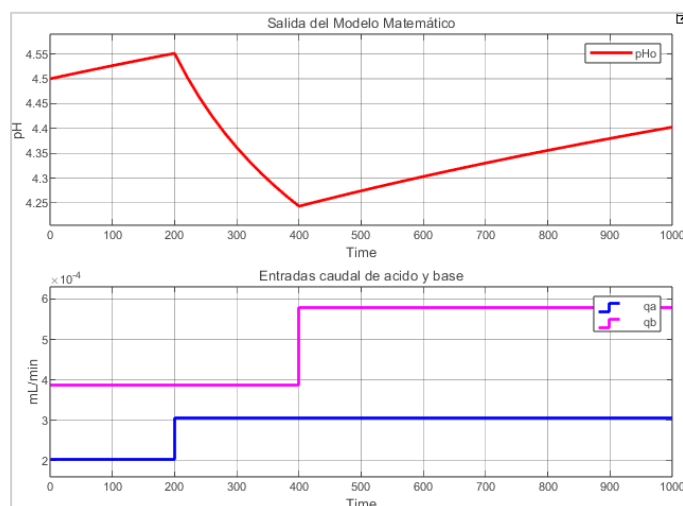


Figura 2.26 Salida pH del modelo matemático (Autor propio, 2025)

Al solo considerarse flujo de entrada, el volumen solo crece, acorde a los valores de las entradas, lo que se puede verificar en la siguiente Figura 2.27.

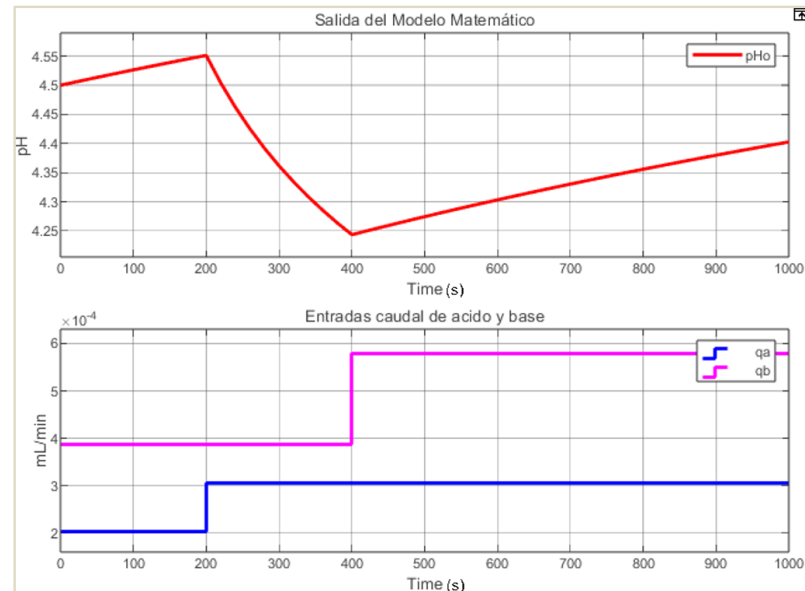


Figura 2.27 Salida Volumen del modelo matemático (Autor propio, 2025)

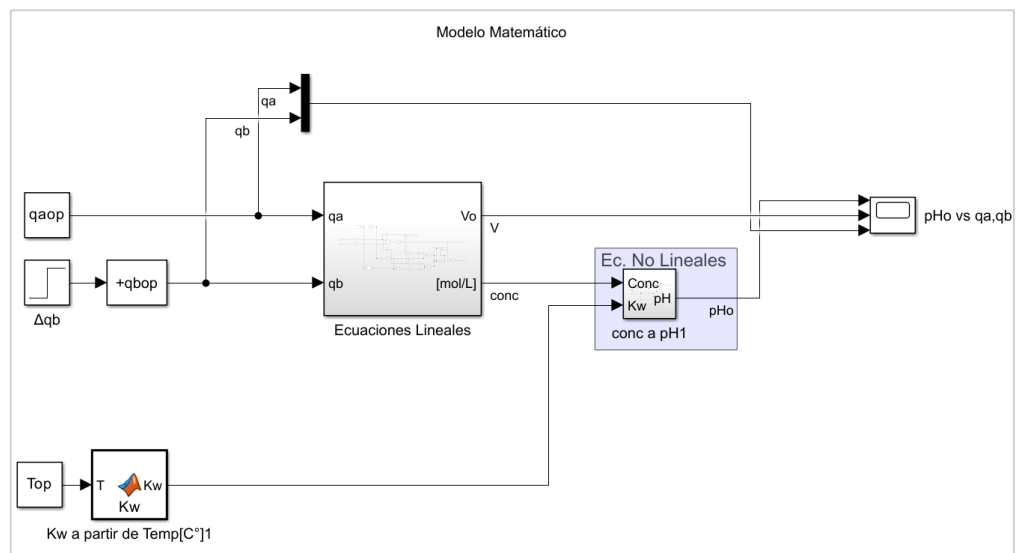


Figura 2.28 Modelo matemático (Autor propio, 2025)

En la Figura 2.28, se observa el diagrama en Simulink resultante del trabajo realizado en esta sección, donde finalmente se agruparon las dos partes del modelo previamente mencionadas en bloques.

2.1.8.6 LINEALIZACIÓN DE ECUACIONES DE CAUDAL-CONCENTRACIÓN

Se procedió a linealizar únicamente las ecuaciones del modelo que no contenían logaritmos, mediante expansión en series de Taylor, ya que incluir las ecuaciones logarítmicas habría restringido el rango de validez del modelo. De este modo, se concentró el análisis en las relaciones entre caudal y concentración, consideradas críticas para la dinámica del proceso. Para este propósito, se empleó el siguiente código en MATLAB:

```
%%- Linealización -%%  
T=Top; %Temp Â°C  
%Kw  
syms T  
Kw = 10^(-4.098 - (3245.2/T) + (2.2362e5)/(T^2) - (3.984e7)/(T^3));  
K1=double(subs(diff(Kw,T),T,25));  
%Kw=K1*(T-Top); %Temp - Temp Operación  
%dn  
syms qa qb  
dn=Ca*qa-Cb*qb;  
  
%dV  
dV=qa+qb;  
%concentracion [H+] ó [OH-]  
syms n V  
conc=n/V;% se asume que dn es siempre positivo  
K4=double(subs(diff(conc,n),[n V],[conci Vi]));  
K5=double(subs(diff(conc,V),[n V],[conci Vi]));  
%Concentración linealizada  
conc=K4*n+K5*V;
```


Del análisis de las ecuaciones se determinó a la constante K1 a partir de la variación del producto iónico del agua (K_w) alrededor de 25 °C. Las constantes K2 y K3, al considerar los caudales de ácido y de base como variables, se derivan de las expresiones que describen el cambio en el tiempo (mol/s) de las concentraciones iónicas (hidronio u oxidrilo), correspondiendo a la concentración de ácido (C_a) y de base (C_b), respectivamente. Finalmente, las constantes K4 y K5 permiten establecer la relación entre el volumen y de número de moles para obtener la concentración expresada en moles por litro. El sistema resultante fue 2 entradas y 2 salidas, se representa en la Figura 2.29:

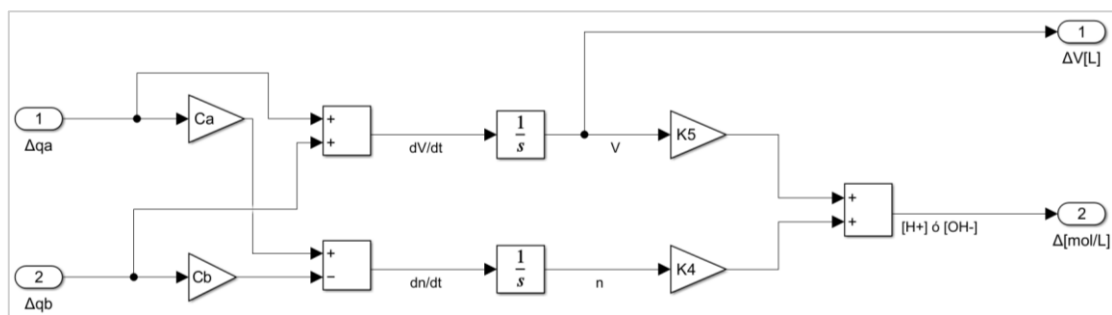


Figura 2.29 Modelo en Simulink de la linealización realizada (Autor propio, 2025)

Se decidió omitir el parámetro K1, debido a que su valor es cero, sobre el modelo anterior, se aplicaron los comandos “linearize” y “tf”, obteniéndose las funciones de transferencia que se presentan en la Figura 2.30:

```

From input "qa" to output...
      1
V[L]:  -
      s

      0.00198
[mol//L]: -----
              s

From input "qb" to output...
      1
V[L]:  -
      s

      -0.001097
[mol//L]: -----
              s

```

Figura 2.30 Funciones de transferencia del sistema caudal-concentración (Autor propio, 2025)

2.1.8.7 VALIDACIÓN DEL MODELO LINEAL

Para validar el modelo lineal, se decidió realizar pruebas comparando sus salidas con las del modelo matemático realizando pequeños cambios en las entradas, alrededor del punto de operación, de tipo pulso debido a la naturaleza integrativa del sistema.

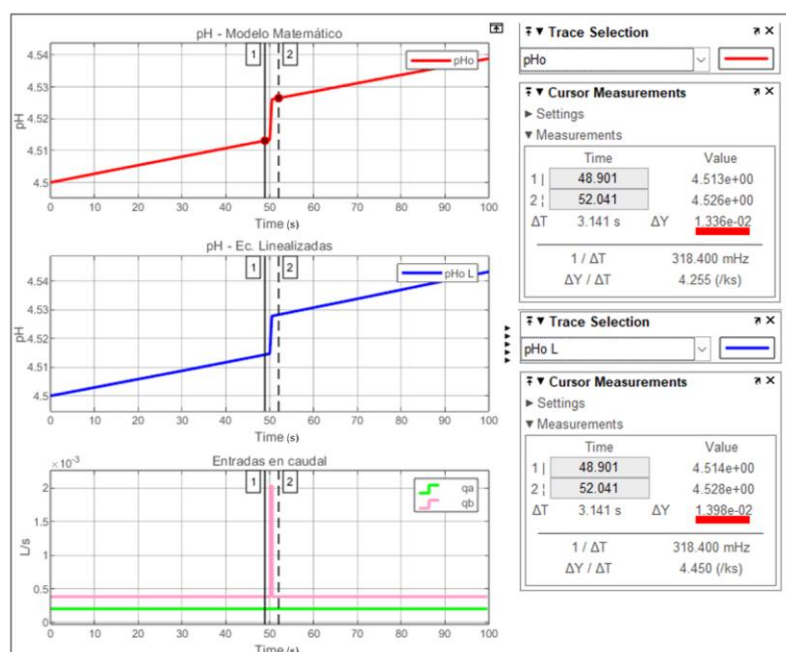


Figura 2.31 Comparación de salidas de pH ante variación pulso (Autor propio, 2025)

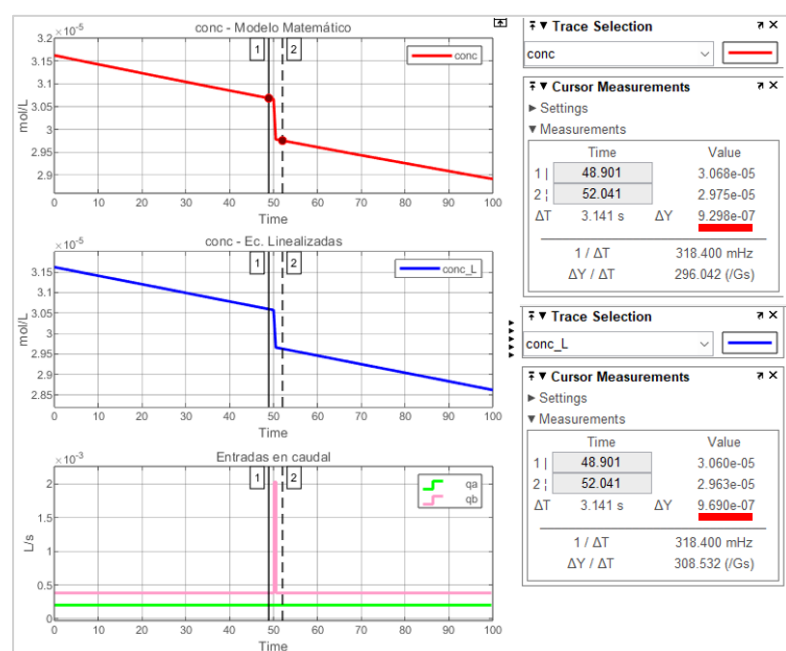


Figura 2.32 Comparación de salidas de concentración ante variación pulso (Autor propio, 2025)

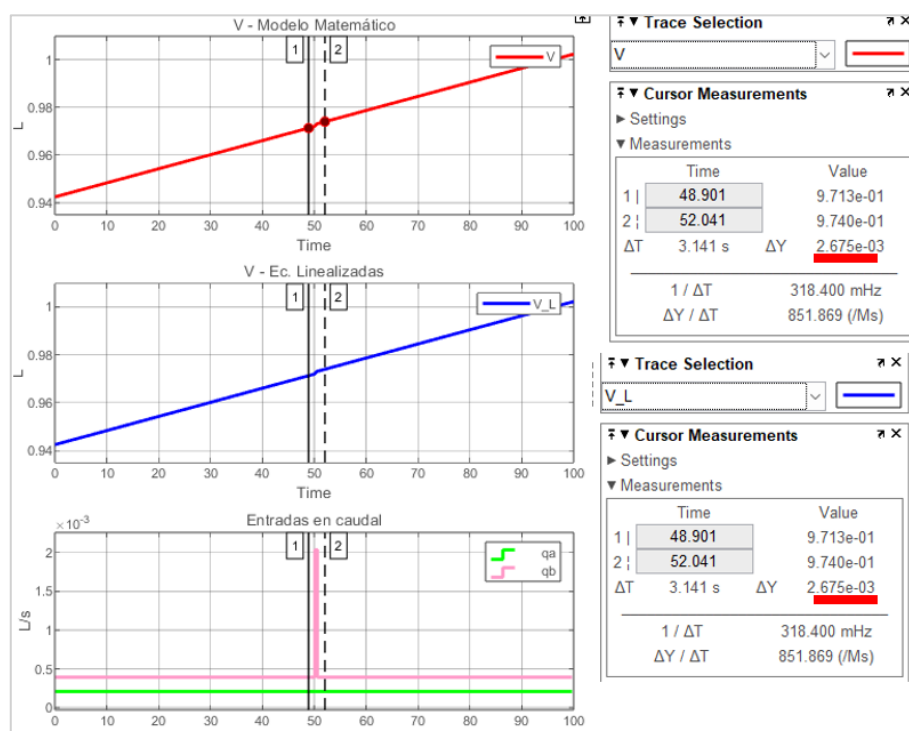


Figura 2.33 Comparación de salidas de Volumen ante variación pulso (Autor propio, 2025)

En las Figuras 2.31, 2.32 y 2.33 se muestran subrayados en rojo la diferencia de los valores de salida antes y después del pulso, es decir la variación de las salidas, luego del cambio en la entrada. Se consideró que las entradas presentarían un valor de operación. Cabe recalcar que la concentración que se observa como salida, es la resultante en el reactor luego de la neutralización, es decir, puede representar concentraciones de iones hidronios u oxidrilos. La parte no lineal del sistema toma ese dato para mostrar un pH en la salida. Se presentaron diferencias entre la concentración y pH comparados, sin embargo, sus magnitudes son pequeñas; por lo tanto, el modelo lineal de concentración se consideró válido. En la Figura 2.34 se presenta el modelo en Simulink para el desarrollo de esta sección:

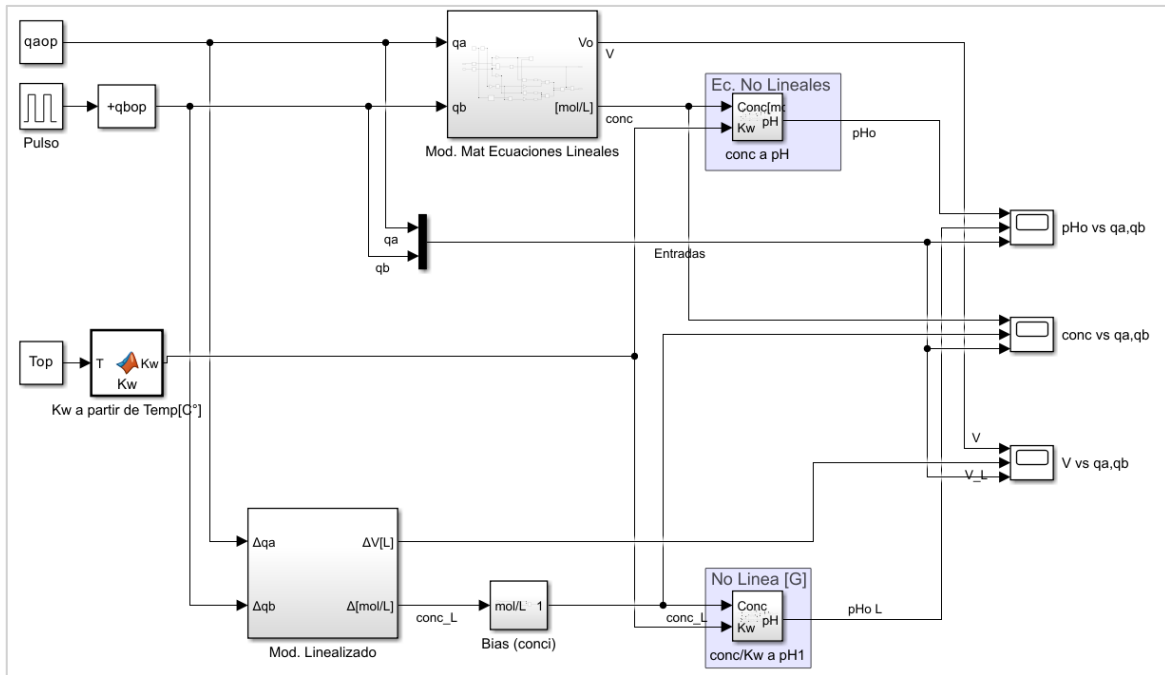


Figura 2.34 Diagrama utilizado para comparar las salidas (Autor propio, 2025)

2.1.8.8 DESARROLLO DEL CONTROLADOR

Una vez validado el modelo lineal este se utilizó para el desarrollo de un controlador PID, alrededor del siguiente punto de operación:

- Concentración: Ácido: 0.1mol/L Base: 0.1mol/L
- Altura (Volumen): 20% de la altura máxima (Vol. max 4.7L, 0.94L)
- pH: 4
- Caudal: 10% del caudal máximo (qmax 122mL/min, 12.2mL/min)

La referencia será de entrada será en pH y luego se transformará en concentración, por lo que el controlador recibe un error en concentración de mol/L. En un medio ácido el pH y la concentración tiene una relación inversamente proporcional, si el pH aumenta, la concentración del ion hidronio baja, es por esto por lo que para que haya control es necesario agregar una ganancia de -1 antes del controlador. Esta prueba se implementó en Simulink, como se muestra en la Figura 2.35:

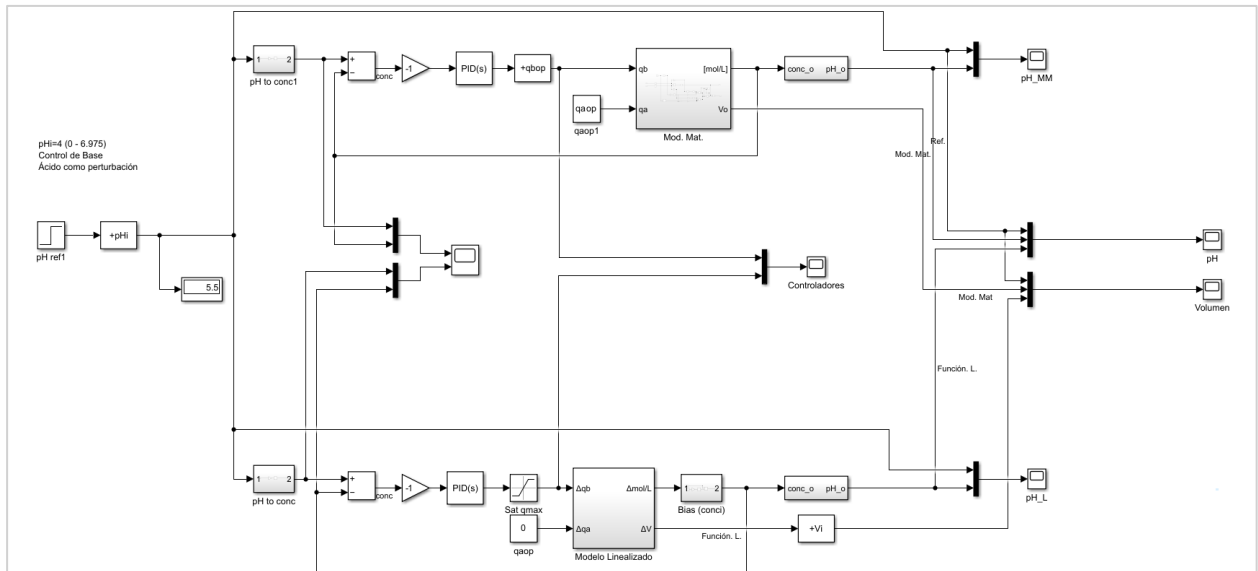


Figura 2.35 Pruebas del controlador, modelo lineal vs modelo matemático (Autor propio, 2025)

En el modelo lineal se tomó en cuenta también las saturaciones debido al caudal máximo y la suma de los puntos de operación con el fin de comparar el efecto de estos sobre la respuesta del sistema. El controlador fue sintonizado utilizando el método de prueba y error. Solo con un controlador de tipo P se logró el control del sistema. En la Figura 2.36 se muestra la respuesta la respuesta obtenida con $P=500$:

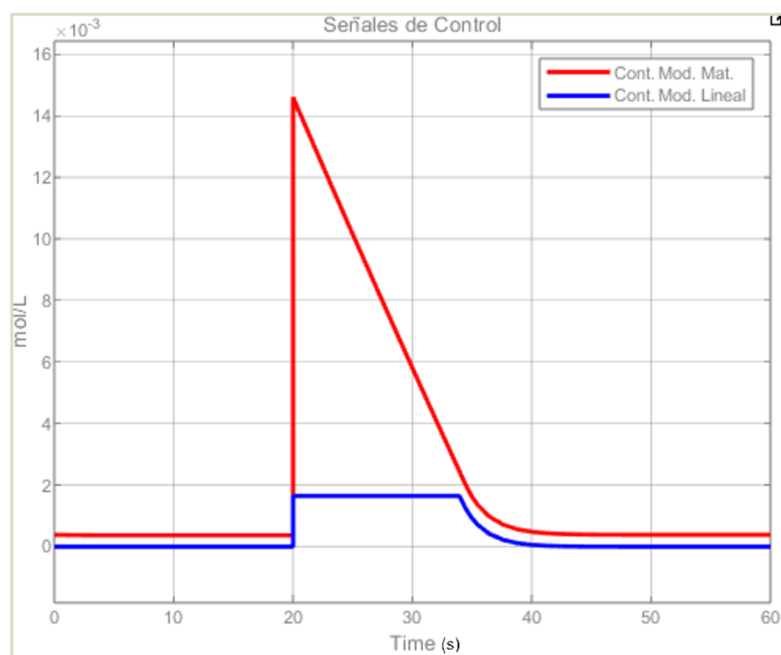


Figura 2.36 Señales de control, modelo linealizado vs modelo matemático (Autor propio, 2025)

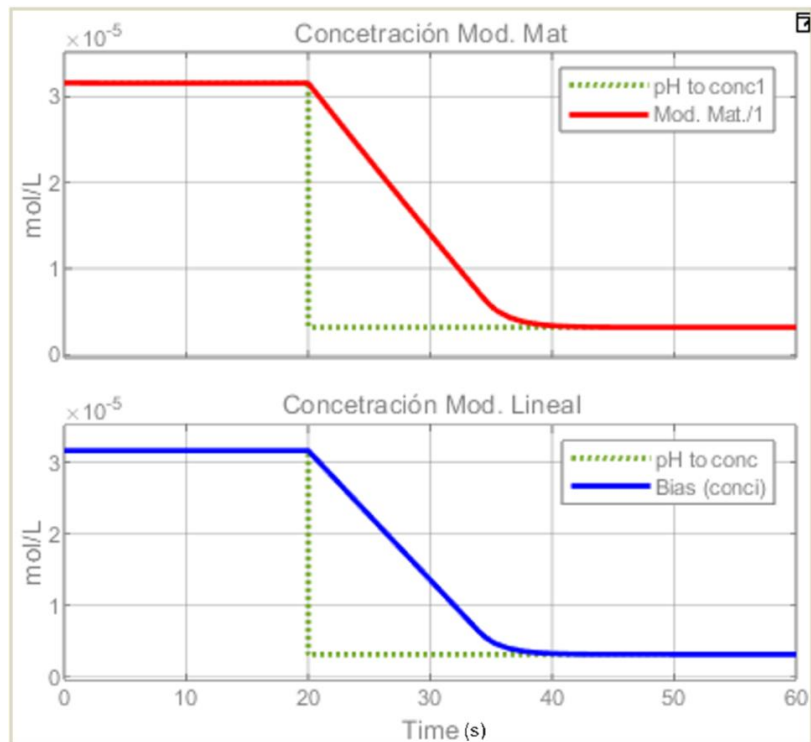


Figura 2.37 Variable concentración (Autor propio, 2025)

Para que el pH aumente en un medio ácido, la concentración de iones hidronios debe disminuir, esto se observa en la Figura 2.37.

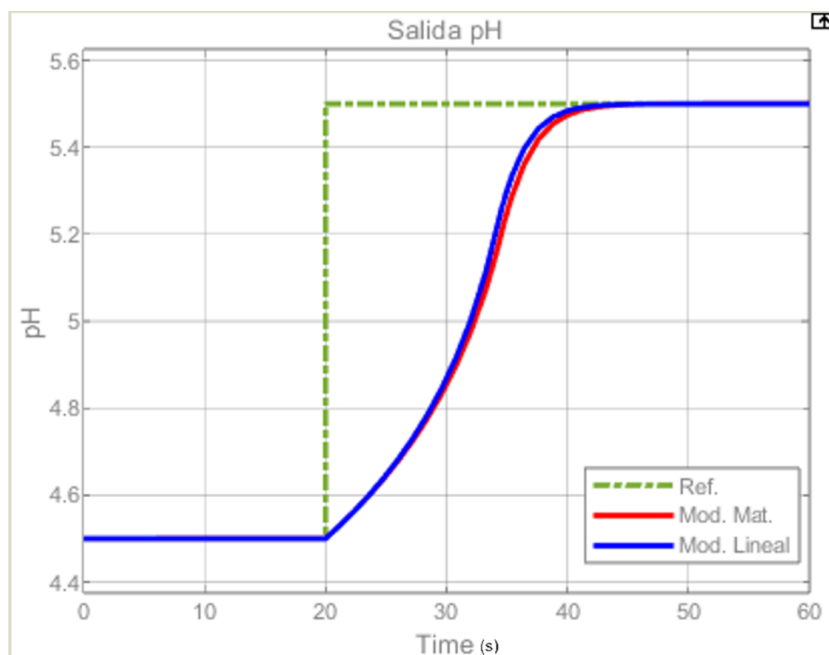


Figura 2.38 Salida de pH – Controlador (Autor propio, 2025)

La Figura 2.38 muestra el control del pH con el cambio en la referencia de 4.5 a 5.5.

2.1.8.9 DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA

Teniendo en cuenta que la tarjeta de adquisición de datos tendría un tiempo de muestreo, se realizó la discretización del sistema usando bloques Zero-Order Hold en Simulink. En la Figura 2.39 se observan los bloques ubicados antes y después del modelo.

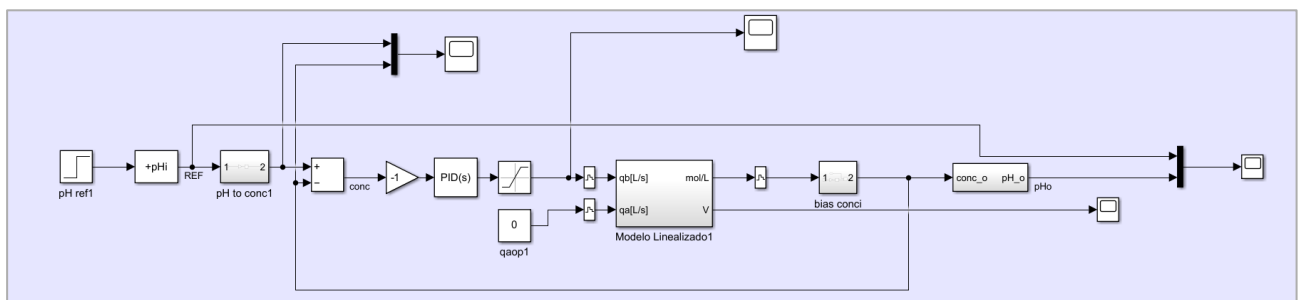


Figura 2.39 Discretización del Sistema con bloques Zero-Order Hold (Autor propio, 2025)

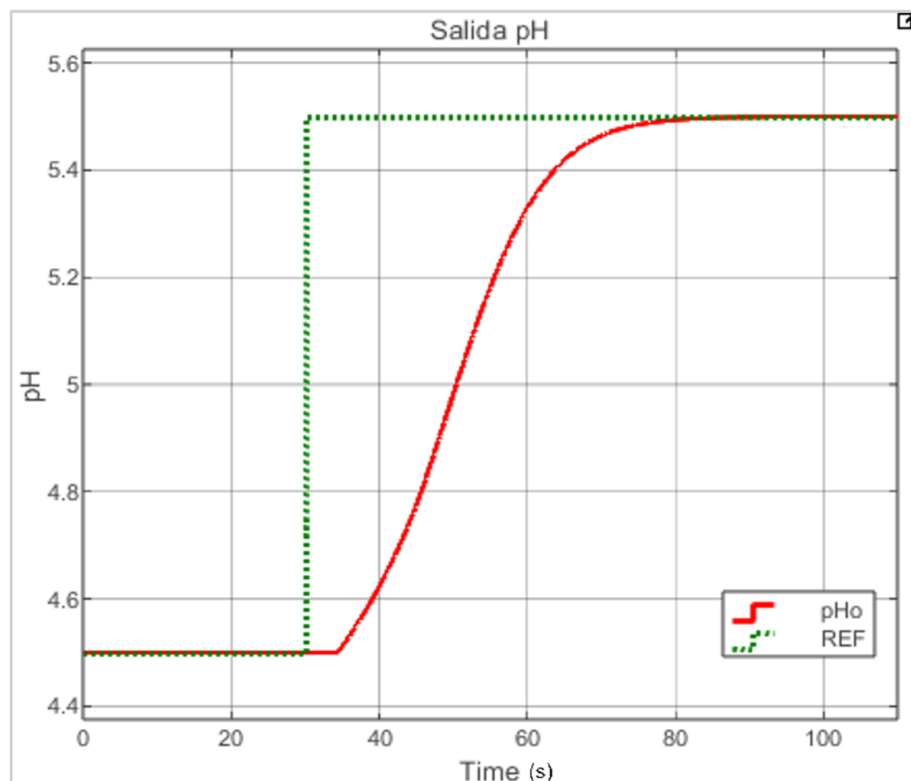


Figura 2.40 Respuesta al controlador del sistema discretizado (Autor propio, 2025)

Se observa en la Figura 2.40 que la respuesta discretizada no presenta cambios indeseados con un tiempo de muestreo de 0.1s.

2.1.8.10 FT DE LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS Y RETARDO

Con el fin de representar el sistema con mayor exactitud, se incorporó al modelo la función de transferencia de las bombas peristálticas, incluyendo su retardo de 4,12 s (ver Figura 2.41).

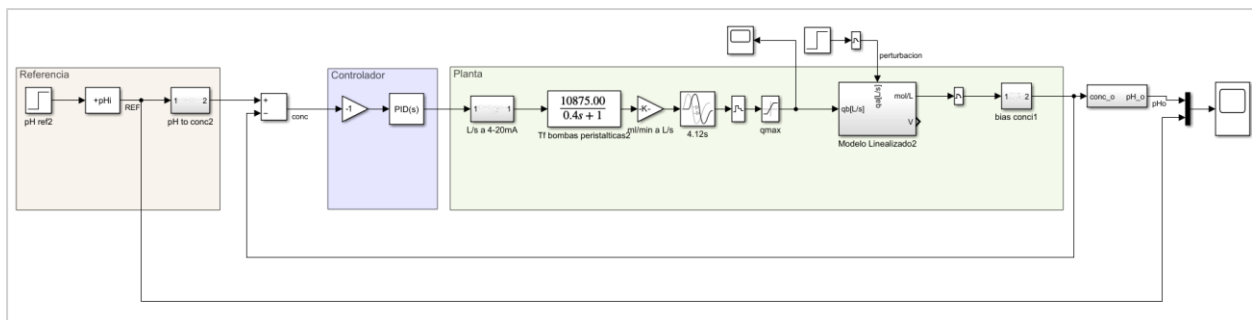


Figura 2.41 Modelo Matemático definitivo (Autor propio, 2025)

A diferencia de pruebas anteriores, esta vez fue necesario volver a sintonizar el controlador. La función de transferencia de las bombas peristálticas convierte entradas en mA a salidas en mL/min, mientras que el modelo trabajado usa caudal en L/s. Por ello, se incorporaron ganancias para convertir las señales a las unidades correctas dependiendo del bloque que alimentan; modificando la respuesta del modelo matemático del reactor (Figura 2.42).

```

From input "qb" to output:
      -3.91
exp(-4.12*s) * -----
                s^2 + 2.5 s
  
```

Figura 2.42 FT de transferencia del modelo matemático (Autor propio, 2025)

En esta ocasión se sintonizó el sistema utilizando sisotool, debido a que con pequeños ajustes a la ganancia anteriormente usada en el controlador no fue posible lograr la estabilidad (Figura 2.43).

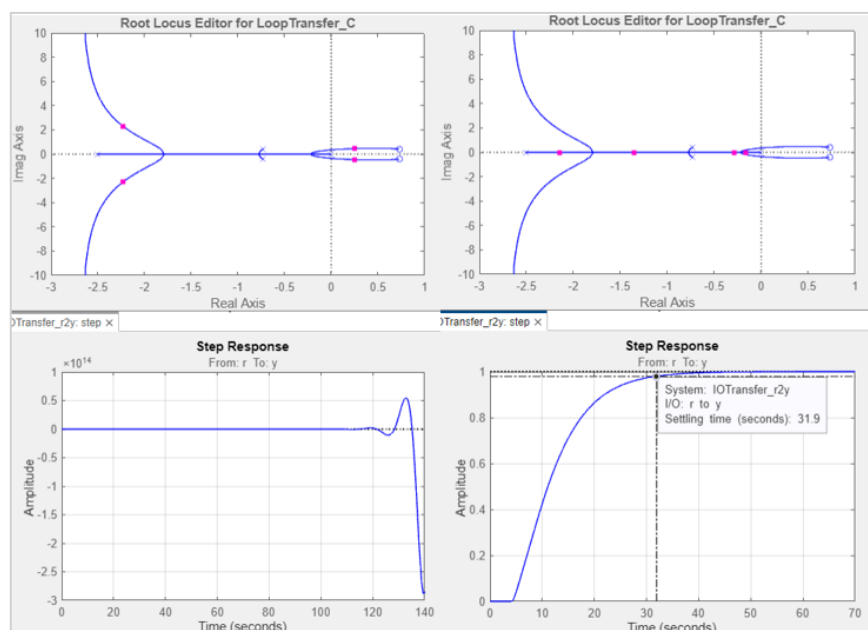


Figura 2.43 Izquierda: Respuesta Inicial en Sisotool. Derecha: Respuesta con el controlador Sintonizado. (Autor propio, 2025)

Para un cambio en la referencia de pH 4.5 a 5.5 se obtuvo una respuesta de primer orden y con error cero (Figura 2.44). $P=0.05$

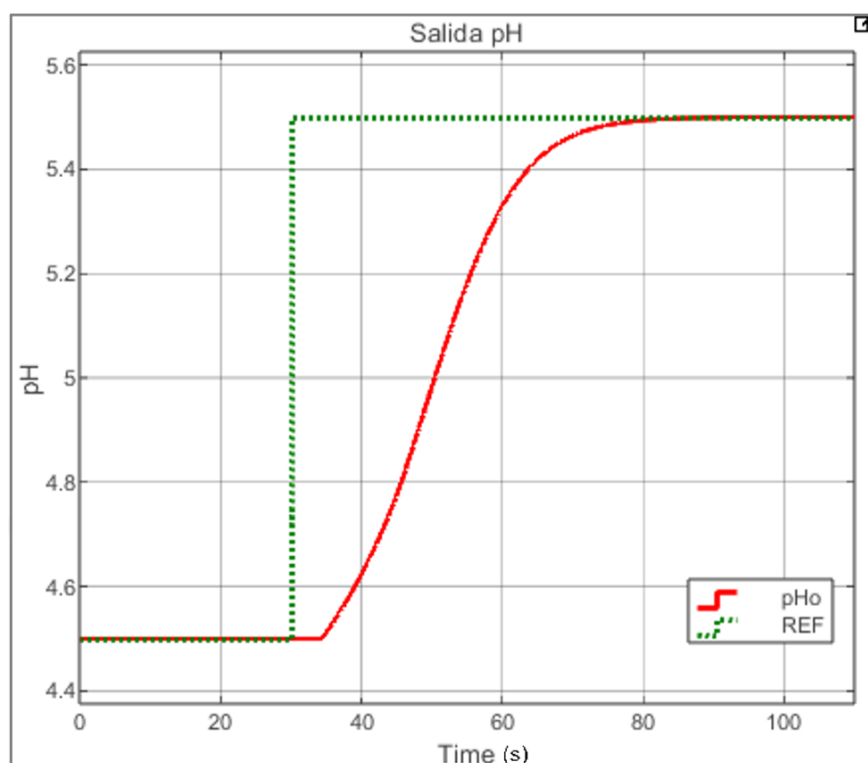


Figura 2.44 Respuesta al control del modelo matemático (Autor propio, 2025)

Se puede observar (Figura 2.44) el retardo entre el cambio en la referencia y la acción del controlador, representando el retardo real que presentan las bombas peristálticas en su acción.

2.1.9 PRUEBAS DEL CONTROLADOR EN LA ESTACIÓN DIDÁCTICA.

2.1.9.1 MODELO EN SIMULINK

Utilizando el bloque de LabJackInterface previamente desarrollado, se construyó el diagrama mostrado en la Figura 2.45 en Simulink, con el fin de realizar las pruebas físicas de control en la estación didáctica:

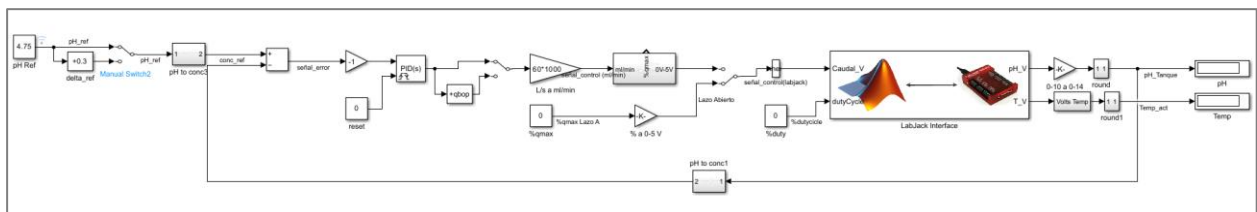


Figura 2.45 Modelo usado para los ensayos con el controlador en la planta real (Autor propio, 2025)

Dado que el bloque de interfaz recibe señales de control en un rango de 0 a 5 V, mientras que en el modelo matemático la salida del controlador se expresaba en L/s, fue necesario aplicar relaciones de conversión para adaptar la señal al valor esperado por la interfaz (Figura 2.46).

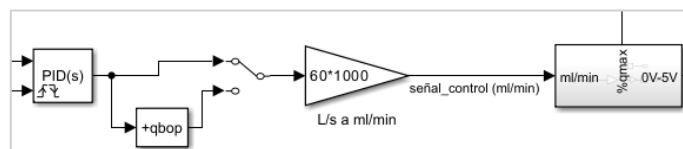


Figura 2.46 Conversión de la señal de control (Autor propio, 2025)

Se implementó también un switch para poder controlar si funcionaba el modelo en lazo cerrado o abierto. Otro switch fue utilizado para realizar el cambio en la referencia. Bloques de conversión de pH a concentración se usaron para convertir la referencia y

salida de pH en concentración para generar correctamente la señal de error del controlador (Figura 2.47).

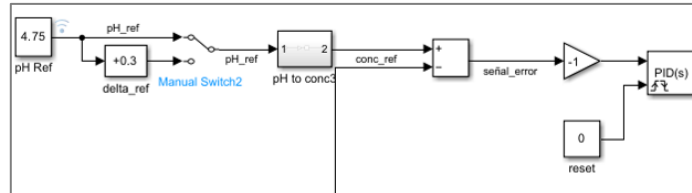


Figura 2.47 Referencia, controlador (Autor propio, 2025)

Se programaron subsistemas para convertir las salidas del bloque Interfaz de señales de 0-10V a valores de pH y temperatura (Figura 2.48).

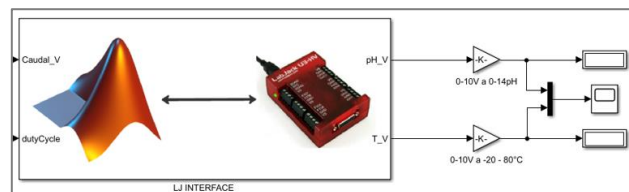


Figura 2.48 Conversión de las salidas (Autor propio, 2025)

Se prepararon scopes y displays para la visualización y guardado de la información. También se configuró para que el modelo se ejecute de tal forma que un segundo de simulación equivalga a un segundo en tiempo real (Figura 2.49).

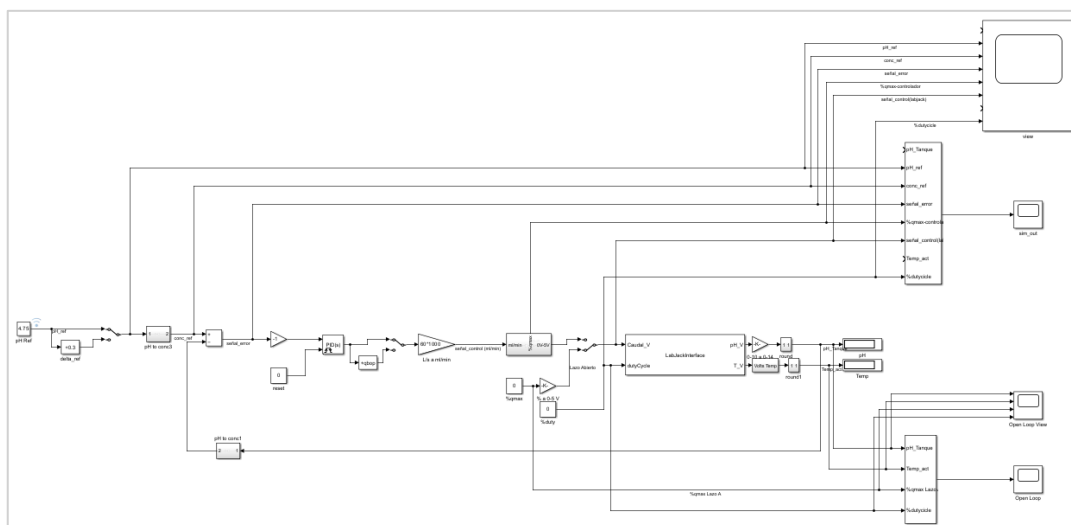


Figura 2.49 Vista general del diagrama de pruebas (Autor propio, 2025)

CAPÍTULO 3

3.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La siguiente sección presenta el informe de evaluación de desempeño de la estación didáctica frente a distintos tipos de controladores, elaborado como entregable para el cliente. En este documento se recopila la documentación necesaria para replicar los ensayos realizados en la planta, así como los resultados obtenidos mediante simulaciones en MATLAB, los cuales permitieron comparar y seleccionar las estrategias de control más adecuadas al proceso.

3.1.1 CONSIDERACIONES PREVIAS AL INICIO DE LOS ENSAYOS

Tras analizar la dinámica de las entradas y salidas del sistema con las variables físicas en la Sección 2.6, se decidió realizar los ensayos enfocándose únicamente en el control de pH del reactor. Dado que el sensor de pH requiere un nivel mínimo de líquido para realizar mediciones, se estableció un volumen inicial de 3,2 L, correspondiente a la altura de la punta de prueba en el tanque (Figura 3.1).



Figura 3.1 Altura de la punta de prueba de pH en el tanque (Autor propio, 2025)

Los experimentos de control de temperatura se omitieron, ya que con un volumen de 3,2 L el cambio térmico del sistema resultó demasiado lento. Por ejemplo, calentar ese volumen 10 °C tomó alrededor de 30 minutos con el intercambiador operando al 100%. Además, en las pruebas en lazo abierto no fue posible enfriar el líquido por debajo

de la temperatura ambiente. A esto se suma que, durante los ensayos de calentamiento, el tanque comenzó a deformarse al aumentar la temperatura (Figura 3.2), por lo que no se alcanzó a determinar la temperatura de estabilización, dado que el cliente solicitó detener el experimento.



**Figura 3.2 Deformación observada en el tanque durante las pruebas de lazo abierto
(Autor propio, 2025)**

3.1.2 PREPARACIÓN DEL MEDIO EXPERIMENTAL

El medio escogido donde se realizaron los ensayos escogidos fue café, esta sustancia inicial posee naturalmente un pH ácido entre 4.5 y 4.8, su preparación es sencilla y poco costosa. Para su preparación se utilizó 5L de agua corriente y un sachet de Don Café Supremo de 50g. Antes de ingresar al café al tanque se utilizó un filtro para disminuir al máximo las partículas sólidas en el líquido (Figura 3.3). Para ingresar el líquido al tanque se utilizó el agujero donde se ubica el sensor de pH y un embudo.



Figura 3.3 Filtrado de la sustancia inicial (Autor propio, 2025)

3.1.3 PREPARACIÓN DE LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS

Se repitió la calibración de las bombas peristálticas obteniendo los mismos valores de caudal máximo que cuando se las revisó para estudiar su dinámica. 131mL/min en la bomba 1 (sustancia ácida), y de 100mL/min en la bomba 2 (sustancia base). Cabe recalcar que se deben cebar las bombas antes de calibrarlas. Se tuvo que mover la botella que contenía la sustancia ácida debido a que en la válvula del nodo 3 se presentó una falla que hacía que la bomba absorba aire (Figura 3.4).



Figura 3.4 Ubicación de la botella de sustancia ácida durante los ensayos (Autor propio, 2025)

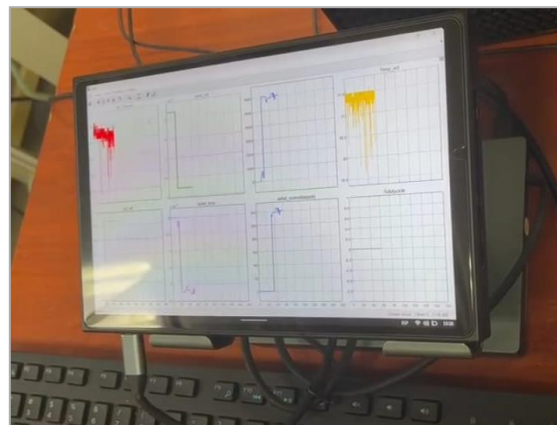


Figura 3.5 Monitoreo de las señales durante los ensayos (Autor propio, 2025)

En la figura anterior se muestra la interfaz desde la cual se monitoreo la información obtenida de los experimentos.

3.1.4 ENSAYO # 1

Condiciones iniciales del ensayo:

La referencia de pH se fijó en 5. El controlador reguló únicamente el caudal de la bomba de sustancia básica, se mantuvo el caudal de la bomba ácida en cero; el agitador y la bomba sumergible permanecieron encendidos durante todo el ensayo.

Resultados:

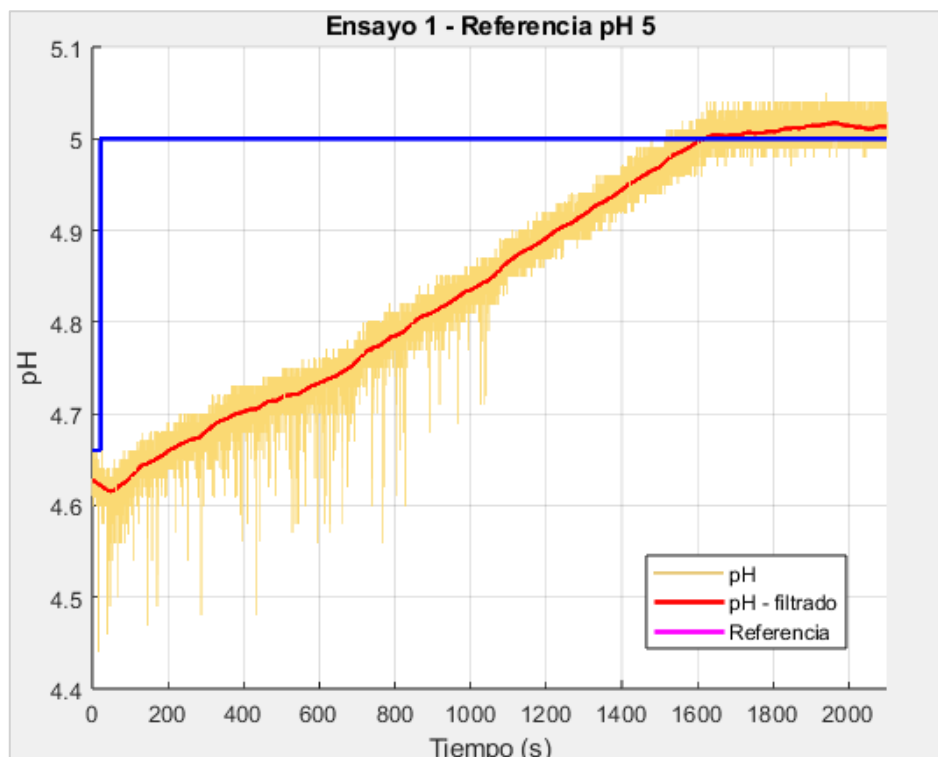


Figura 3.6 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)

En la Figura 3.6 se logra observar el aumento del pH del tanque hasta alcanzar el valor de referencia, la respuesta obtenida es de primer orden, igual que en los ensayos realizados con el modelo matemático y lineal del proceso. Los índices de desempeño se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos del ensayo 1

Variables	Valor	Unidad	Abreviatura
Volumen inicial	3.2	Litros	Vi
pH inicial	4.6	pH	pHi
Temperatura Ambiente	22.3	°C	T
Caudal base inicial	0	mL/min	qbi
Caudal ácido inicial	0	mL/min	qai
Tiempo Estabilización	1,623.2	segundos	Tss
Error en estado estacionario	3.9	%	ESS
Sobrepico	5.0	%	SP

Nota. Datos tomados a partir del ensayo

3.1.5 ENSAYO # 2

Condiciones iniciales del ensayo:

Partiendo de un pH inicial de 5.01, se incrementó la referencia en 0,17. El controlador reguló solo el caudal de la bomba de sustancia básica, se mantuvo la bomba ácida en cero; el agitador y la bomba sumergible permanecieron encendidos durante el ensayo.

Resultados:

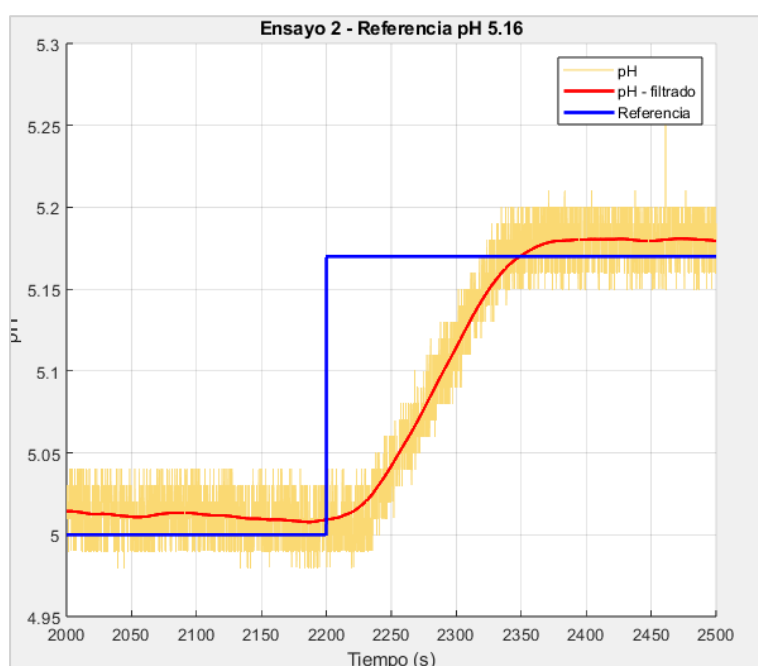


Figura 3.7 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)

En este segundo ensayo la variación en la referencia es menor que en la del ensayo anterior (Figura 3.7), sin vemos una similitud en los índices de desempeño obtenidos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Datos del ensayo 2

Variables	Valor	Unidad	Abreviatura
Volumen inicial	3.2	Litros	Vi
pH inicial	5.0	pH	pHi
Temperatura Ambiente	22.3	°C	T
Caudal base inicial	0	mL/min	qbi
Caudal ácido inicial	0	mL/min	qai
Tiempo Estabilización	169.7	segundos	Tss
Error en estado estacionario	5.8	%	ESS
Sobrepico	6.2	%	SP

Nota. Datos tomados a partir del ensayo

3.1.6 ENSAYO # 3

Condiciones iniciales del ensayo:

Con un pH inicial de 5.18, la referencia se incrementó en 0.12. En esta prueba, se configuró a la bomba de ácido para que mantuviera un caudal constante del 10% (13.3 mL/min), con el fin de simular una entrada continua de sustancia y que el controlador se encargue de contrarrestar el efecto de la sustancia ácida con el caudal de la bomba que suministra base. Acorde con el experimento realizado en la sección 2.6.6, el caudal mínimo de la bomba de base fue configurado con un valor 1.9 veces mayor al de la bomba de base con un bloque bias. Durante todo el experimento permanecieron encendidos tanto el agitador como la bomba sumergible.

Resultados:

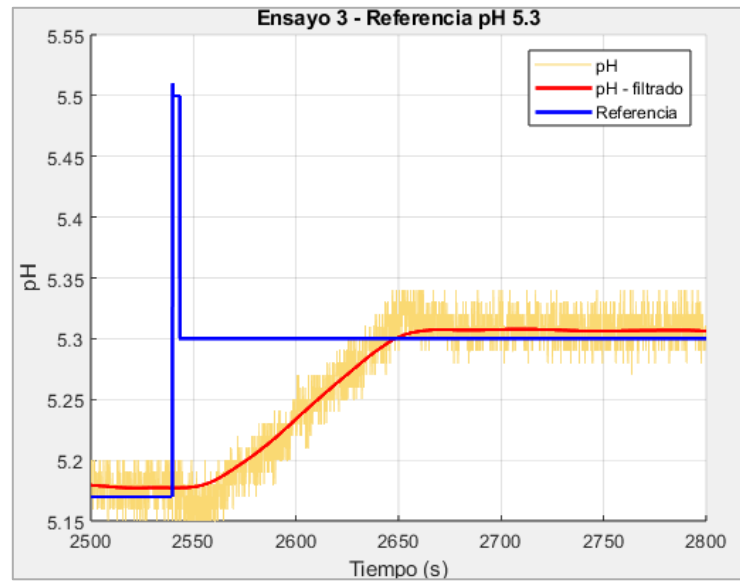


Figura 3.8 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)

En esta ocasión disminuyó aún más el cambio en la referencia para obtener un menor tiempo de estabilización, sin embargo, este ensayo se diferencia de los anteriores debido a que existe una entrada continua de ambas sustancias en su punto de operación. La respuesta (Figura 3.8) y los índices (Tabla 3.3) no presentan diferencias importantes en comparación con los ensayos anteriores.

Tabla 3.3 Datos del ensayo 3

Variables	Valor	Unidad	Abreviatura
Volumen inicial	3.2	Litros	Vi
pH inicial	5.1	pH	pHi
Temperatura Ambiente	22.3	°C	T
Caudal base inicial	0	mL/min	qbi
Caudal ácido inicial	13.3	mL/min	qai
Tiempo Estabilización	123.5	segundos	Tss
Error en estado estacionario	1.5	%	ESS
Sobrepico	6.1	%	SP

Nota. Datos tomados a partir del ensayo

3.1.7 ENSAYO # 4

Condiciones iniciales del ensayo:

Se mantuvo el valor de la referencia fija en un pH de 5.3, con entrada constante de ácido y base, se buscó que el controlador, que regula el caudal de la bomba de sustancia básica, actúe de acuerdo con las perturbaciones inducidas por la bomba de ácido, la cual se ubicó inicialmente en 10% (13.3mL/min) con el potenciómetro; el agitador y la bomba sumergible permanecieron encendidos durante el ensayo.

Resultados:

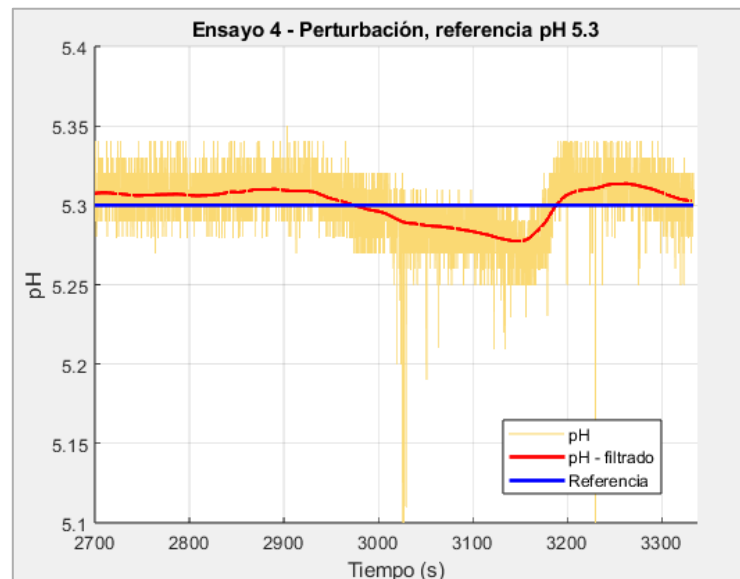


Figura 3.9 Salida de pH y referencia del controlador (Autor propio, 2025)

En la Figura 3.8 se observa la salida de pH debido a la acción del controlador para corregir el pH mientras se mantiene la referencia constante.

3.1.8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En los ensayos realizados, el sistema con el controlador presentó un error en estado estacionario promedio de 3.73%, un sobre pico de promedio de 5.7%. La respuesta del sistema se asemejó a uno de primer orden. A pesar de que tanto base y ácido ingresaron a la vez en el ensayo 3 y 4, la respuesta del sistema presento características similares a si solo ingresara un tipo de sustancia al tanque. Con 50

minutos de pruebas, el nivel de líquido del tanque no llegó a alcanzar el punto de rebose. El efecto del uso de sustancias de concentraciones baja se nota en los altos tiempos de estabilización del sistema, a menores cambios en la referencia, el sistema tarda menos en alcanzarlos. En general, el sistema no muestra comportamiento inestable incluso frente a perturbaciones. (Figura 3.10).

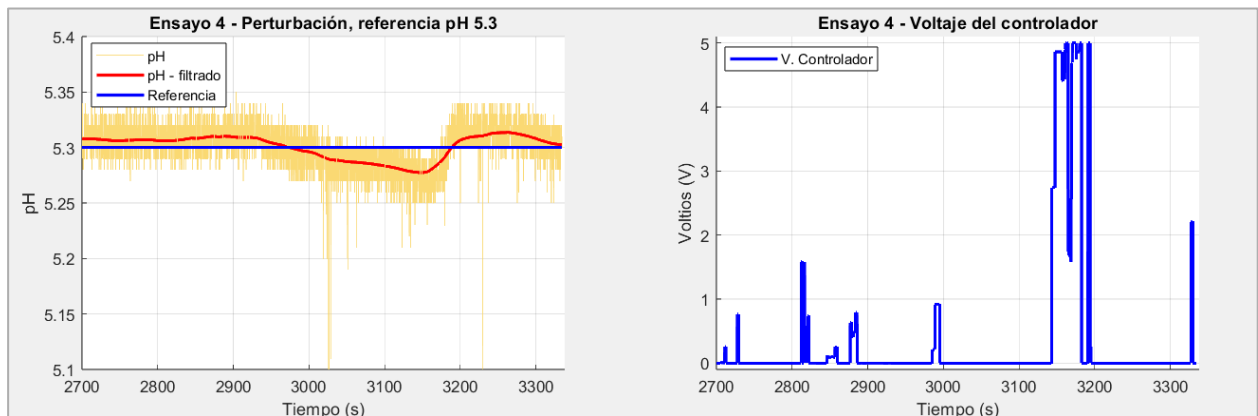


Figura 3.10 Respuesta del controlador ante perturbaciones (Autor propio, 2025)

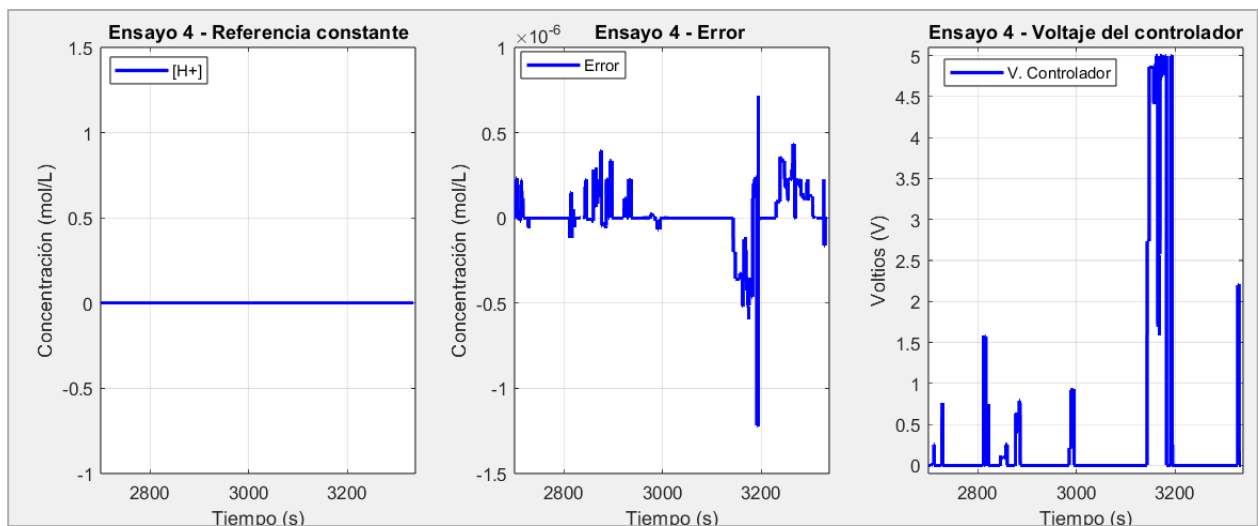


Figura 3.11 Referencia, error y señal de control (Autor propio, 2025)

La magnitud del error en la concentración es del orden de 10^{-6} , pequeño en comparación al cambio en la referencia de pH, a pesar de ello, se observa como frente a este error y la condición de que continuamente ingresa sustancia, el controlador es capaz de conseguir una respuesta estable del sistema.

3.2 ANÁLISIS DE COSTOS

Los componentes de mayor inversión corresponden a los equipos especializados adquiridos en Amazon, entre ellos el medidor de pH y temperatura (LabJack U3-HV), la tarjeta de adquisición de datos, el controlador de motores agitadores, la celda Peltier con intercambiador de calor y la Mini bomba sumergible. Estos elementos representan más del 70% del presupuesto total y resultan indispensables para el control de la estación.

En contraste, materiales como canaletas, cables, terminales, borneras, relés, selectores y accesorios fueron obtenidos en ferreterías y casas de electrónica locales, a un costo unitario menor y con facilidad de reposición. Finalmente, los reactivos químicos ácido sulfúrico e hidróxido de sodio fueron adquiridos en casas químicas especializadas. En conclusión, el proyecto demuestra ser económicamente viable, ya que la mayoría de los materiales son de fácil acceso y bajo costo, mientras que la inversión más significativa recae en los sensores y dispositivos de control. Si bien existen alternativas más económicas en el mercado, la selección de los equipos se basó en su confiabilidad y durabilidad a largo plazo, priorizando así la eficiencia y sostenibilidad de la estación didáctica.

Véase el APÉNDICE D: TABLA DE COSTOS

CAPÍTULO 4

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1 CONCLUSIONES

- Se documentó el estado actual de los componentes físicos y funcionales de la estación didáctica y se actualizaron los planos eléctricos mediante AutoCAD, lo que permitió identificar deficiencias y establecer los requerimientos necesarios para su rediseño. En las secciones 2.1.1, 2.1.2 y 2.1.3 se resumieron los puntos más importantes del documento entregado al cliente.
- Se elaboró un diagrama de Gantt que permitió organizar y planificar las actividades desarrolladas durante la ejecución del proyecto, garantizando un orden lógico en las tareas de modernización (Véase en APÉNDICE A). Este diagrama fue actualizado de manera continua conforme avanzaban las actividades, dejando constancia del tiempo de ejecución y del progreso alcanzado en cada etapa, lo cual resultó fundamental para organizar, registrar y supervisar de forma sistemática las intervenciones realizadas en la estación didáctica durante su proceso de modernización.
- Mediante las pruebas en lazo abierto fue posible caracterizar dinámicamente la estación didáctica, identificando las particularidades de cada módulo, dispositivo y sustancia involucrada en el proceso. Este análisis permitió construir un modelo matemático representativo del sistema, capaz de reflejar con precisión la respuesta del reactor, y que constituyó la base para el diseño de un controlador proporcional de caudal. Las consideraciones derivadas de esta caracterización, detalladas en la Sección 2.1.6, evidencian cómo cada elemento aportó al desarrollo del controlador, asegurando que el sistema alcanzara la respuesta dinámica deseada.
- El uso de MATLAB y Simulink, en conjunto con la interfaz LabJack U3-HV, permitió integrar de manera efectiva la adquisición de señales de los sensores y el control de los actuadores, lo que hizo posible evaluar el desempeño de la estación didáctica frente al controlador desarrollado. Los resultados confirmaron la utilidad del LabJack como una herramienta fundamental para la integración y validación del sistema, asegurando la fiabilidad de los ensayos realizados.

4.1.2 RECOMENDACIONES

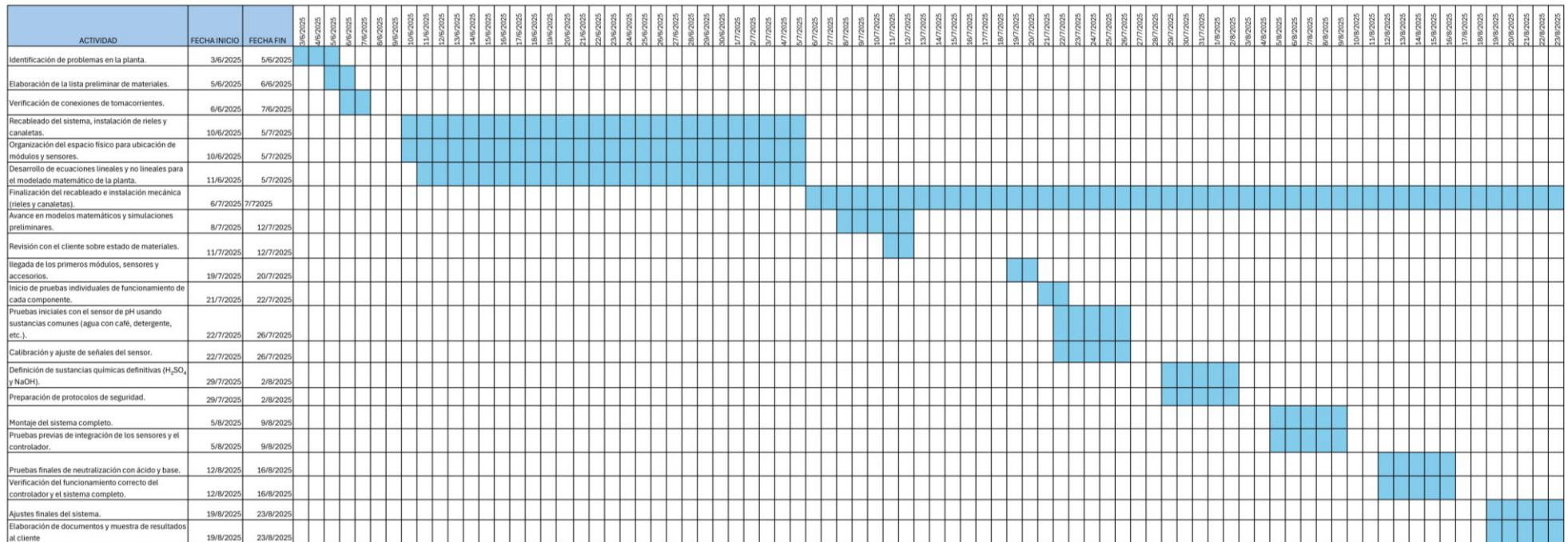
- Se sugiere reemplazar las bombas peristálticas actualmente utilizadas por equipos más modernos y de mejor desempeño, tales como bombas dosificadoras de diafragma. Este tipo de bombas ofrecen un control más directo e inmediato sobre el caudal de las sustancias químicas, lo que representa una ventaja significativa frente a las bombas peristálticas que están en la estación didáctica, las cuales presentan un retardo en el tiempo de respuesta cercano a 4,12 segundos al momento de aumentar o disminuir su porcentaje de eficiencia de trabajo.
- Se recomienda mejorar el sistema de alimentación de la estación didáctica mediante la instalación de mangueras de mayor longitud o la reestructuración del espacio de montaje de los recipientes. Actualmente, el operador debe sostener manualmente los envases para que las bombas peristálticas puedan succionar el fluido, lo que representa una incomodidad y una limitación en la eficiencia del proceso.
- Se recomienda ampliar o reorganizar el espacio del tablero de la estación didáctica con el fin de reducir el ruido eléctrico generado por la acumulación de cableado en un área reducida. La concentración de conductores en espacios limitados puede producir interferencias electromagnéticas que afectan la estabilidad de las señales y disminuyen la precisión en el control del proceso. De esta manera, se logrará un funcionamiento más seguro y estable de la estación a lo largo de los años.
- Con el bloque de interfaz implementado, se abre la posibilidad de escalar el sistema y añadir más dispositivos de forma modular, lo que permitiría ampliar las capacidades de la estación didáctica y complementar el trabajo realizado. Esta flexibilidad posibilita la integración de nuevos sensores, actuadores o módulos de comunicación que fortalezcan la utilidad de la estación didáctica y permita que sea adaptada para futuros requerimientos académicos o de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

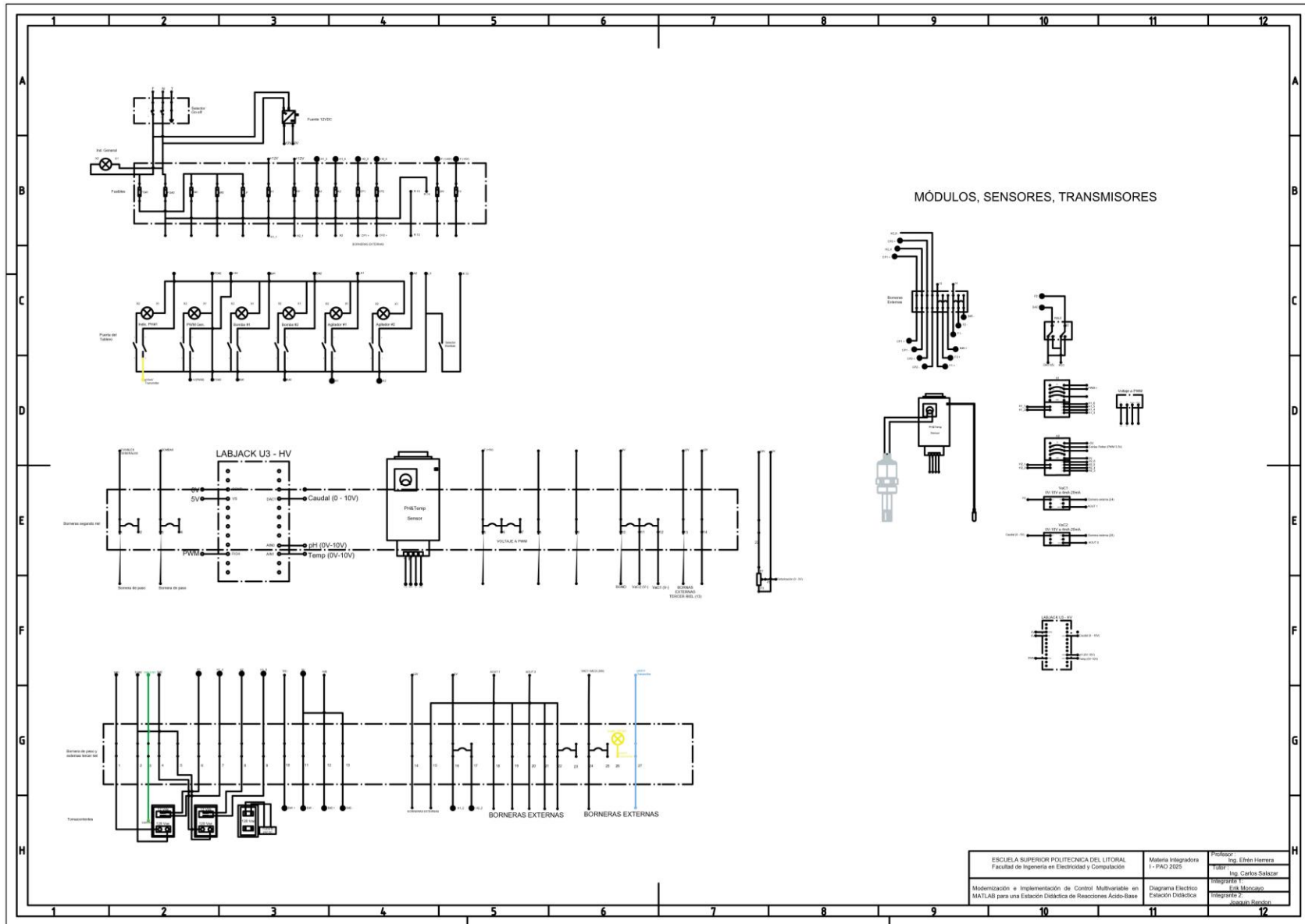
- AcademiaLab. (2025). *Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon*. <https://academia-lab.com/enciclopedia/teorema-de-muestreo-de-nyquist-shannon/>.
- Bongiorno, J., & Park, K. (2020). *Design of Linear Multivariable Feedback Control Systems*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-44356-6>.
- Elfandi, M. (1996). *Modern control systems engineering*. doi: <https://doi.org/10.1002/rnc.1081>.
- González, L. (2017). *Estudio de la temperatura y su efecto en la velocidad de las reacciones químicas a partir de una perspectiva fenomenológica*. <http://hdl.handle.net/20.500.12209/10190>.
- Gustafsson, T., Skrifvars, B., Sandstrom, K., & Waller, K. (1995). *Modeling of pH for Control*. doi: <https://doi.org/10.1021/ie00042a014>.
- Johan Åström, K., & Murray, R. M. (2010). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. doi: 10.5860/choice.46-2107.
- Marshall, W., & Franck, E. (1981). *Ion product of water substance, 0–1000 °C, 1–10,000 bars New International Formulation and its background*. <https://doi.org/10.1063/1.555643>.
- Ramos, M. M. (2012). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA PLANTA DE LABORATORIO*. Guayaquil, Ecuador : Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Seborg, D., Edgar, T., Mellichamp, D., & Doyle, F. (2016). *Process Dynamics and Control, 4th Edition*.
- Shannon, C. (1949). *Communication in the Presence of Noise*. doi: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
- Shinskey, G. (2000). *Control of PH*. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315214061>.
- Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control-Analysis and Design*. doi: 10.1109/MCS.2007.284514.
- Zeng, Z., Liu, J., & Yuan, Y. (2024). *A Generalized Nyquist-Shannon Sampling Theorem Using the Koopman Operator*. <https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3436610>.

APÉNDICES

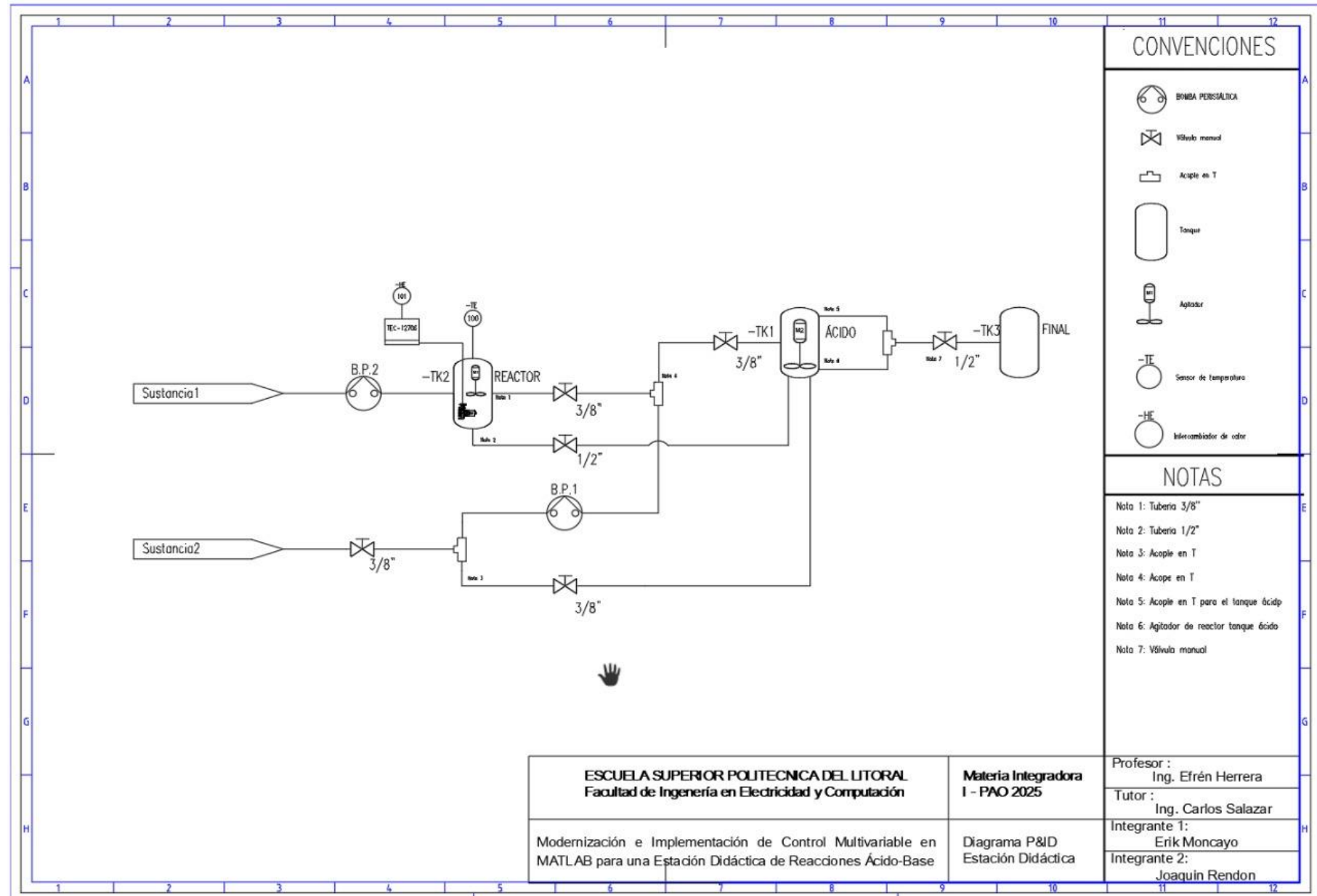
APÉNDICE A: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



APÉNDICE B: DIAGRAMA ELÉCTRICO



APÉNDICE C: DIAGRAMA P&ID



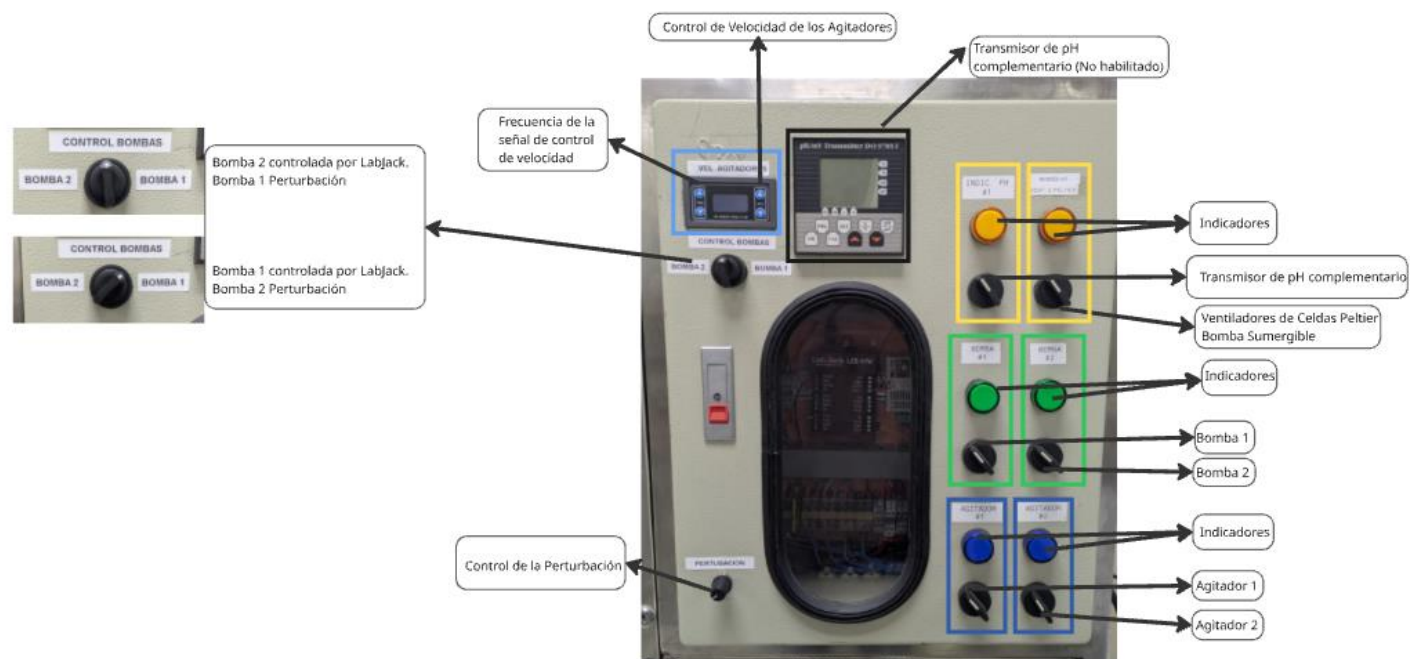
APÉNDICE D: TABLA DE COSTOS

Descripción	Modelo/Referencia	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Neto (\$)
Medidor de pH y temperatura (0-10V 0 4-20mA)		1	\$ 129,00	\$ 129,00
Tarjeta de adquisición de datos	LabJack U3-HV	1	\$ 200,00	\$ 200,00
Driver para los motores agitadores / celdas peltier	DROK XY-L600 (L298 H-Bridge)	2	\$ 23,00	\$ 46,00
Celda Peltier con intercambiador de calor, disipador de calor y ventiladores	TEC1-12706 (kit con disipador y ventiladores)	1	\$ 115,00	\$ 115,00
Mini bomba sumergible	HILETGO 240L/H 12V	1	\$ 34,00	\$ 34,00
Riel DIN 35mm acero (1mt)		1	\$ 2,45	\$ 2,45
Canaleta ranurada 33x33mmx2m		2	\$ 6,76	\$ 13,52
Cable ext. flex. No 18 AWG azul TFF (7 metros)		1	\$ 0,24	\$ 1,68
Cable ext. flex. No 18 AWG negro TFF (10 metros rollo)		1	\$ 0,24	\$ 2,40
Cable ext. flex. No 22 AWG (10 metros rollo)		1	\$ 0,35	\$ 3,50
Cable ext. flex. No 18 AWG rojo TFF (7 metros)		1	\$ 0,24	\$ 1,68
Terminales de punta #22-18 rojo, amarillo, azul (100 terminales)		1	\$ 4,70	\$ 4,70
Terminal tipo 'U' #22-18 rojo (100 terminales)		1	\$ 4,70	\$ 4,70
Bornera Siemens 1 polo 24 AMP AWG 12		9	\$ 1,20	\$ 10,90
Baquelita		1	\$ 10,00	\$ 10,00
Ácido sulfúrico (20% A 100 mL)		1	\$ 25,32	\$ 25,32
Hidróxido de sodio (20% A 100 mL)		1	\$ 23,00	\$ 23,00
20 borneras adicionales		20	\$ 1,37	\$ 27,40

8 borneras de 10A		8	\$ 0,20	\$ 1,60
Relé Schneider de 8 pines		1	\$ 52,00	\$ 52,00
Selector de 6 posiciones		1	\$ 6,00	\$ 6,00
Rollo de cable gris No 18 AWG (50 m)		1	\$ 22,00	\$ 22,00
Rollo de cable (5 m)		1	\$ 1,10	\$ 1,10
Cable de dos hilos (10 m)		1	\$ 3,00	\$ 3,00
TOTAL				\$ 740,95

APÉNDICE E: MANUAL DE OPERACIÓN DE LA ESTACIÓN DIDÁCTICA

MANUAL OPERATIVO DE LA ESTACIÓN DIDÁCTICA



1

Selector - Lateral Izquierdo



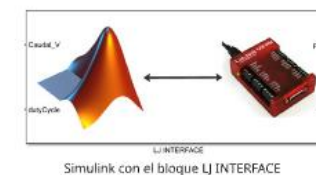
2

Alimentación del Labjack



3

Interfaz Simulink - Labjack



Medidas de Seguridad	
Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que la estación esté desconectada de antes de realizar conexiones o mantenimiento. • No manipular elementos del tablero mientras la planta esté energizada. • Evitar manipular con mano húmedas. • Operar las celdas peltier de forma continua a un máximo del 80% de su capacidad.
Química	<ul style="list-style-type: none"> • No utilizar sustancias (ácido/base) de alta concentración para los experimentos. • Considerar los siguientes EPP: <ul style="list-style-type: none"> ○ Guantes de nitrilo resistentes a químicos. ○ Gafas de seguridad para proteger los ojos. ○ Bata de laboratorio que cubra brazos y piernas. • Bombas deben estar cebadas antes de operar. Se recomienda utilizar agua destilada. • Limpiar derrames de inmediato. • Identificar correctamente las sustancias químicas antes de su uso, asegurándose de conocer y respetar las precauciones específicas asociadas a cada una.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Luego del uso se recomienda enjuagar los sensores de pH y temperatura con agua destilada. • Para preservar adecuadamente el electrodo de pH, utilice exclusivamente solución de almacenamiento específica para electrodos de pH. Nunca utilice agua destilada o alcohol. • Revisar conexiones eléctricas y los fusibles antes de cada uso. • Mantener los equipos libres de polvo.
Generales	<ul style="list-style-type: none"> • No operar la estación sin la supervisión de un docente o técnico responsable. • Prohibido ingerir alimentos o bebidas en el área de prácticas. • Registrar incidentes, fallas o anomalías detectadas en caso de que ocurran. • No modificar ni intervenir el cableado sin autorización previa. • No almacenar materiales innecesarios dentro de la estación didáctica y/o tablero eléctrico. • Mantener la puerta del tablero cerrada durante las prácticas. • Asegurar que todos los operadores hayan leído el manual operativo antes de utilizar la estación.