



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR EN EL
ESPACIO DE ESTADOS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA
PLANTA DIDÁCTICA (EPC) USANDO LABVIEW**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica**

AUTORES: BRIAN ROLANDO SOTO NOBOA

MARIO VLADIMIR CHAUCA AREVALO

TUTOR: PhD. VICTOR MANUEL HUILCAPI SUBIA

Guayaquil – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Brian Rolando Soto Noboa con documento de identificación N° 0928041417 y Mario Vladimir Chauca Arevalo con documento de identificación N° 0955226949, manifestamos que:

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

Guayaquil, 12 de Agosto del año 2024.

Atentamente,



Brian Rolando Soto Noboa
0928041417-7



Mario Vladimir Chauca Arevalo
095522694-9

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

Nosotros, Brian Rolando Soto Noboa con documento de identificación N° 0928041417 y Mario Vladimir Chauca Arevalo con documento de identificación N° 0955226949, manifestamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño e implementación de un Controlador en el Espacio de Estados para el control de temperatura en una planta didáctica (EPC) usando Labview”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

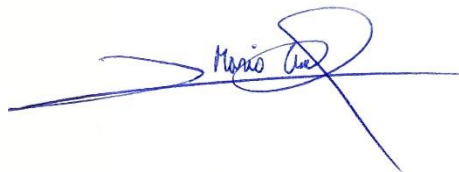
Guayaquil, 12 de Agosto del año 2024.

Atentamente,



Brian Rolando Soto Noboa

0928041417-7



Mario Vladimir Chauca Arevalo

095522694-9

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Víctor Manuel Huilcapi Subia con documento de identificación N° 0917206294, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR EN EL ESPACIO DE ESTADOS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA PLANTA DIDÁCTICA (EPC) USANDO LABVIEW, realizado por Soto Noboa Brian Rolando con documento de identificación N° 0928041417 y Chauca Arevalo Mario Vladimir con documento de identificación N° 0955226949, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 de Agosto del año 2024.

Atentamente,



PhD. Victor Manuel Huilcapi Subia
0917206294

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación va dedicado a mi Dios Padre Celestial, quien ha sido mi guía y fortaleza durante toda mi carrera universitaria.

A mis queridos padres, cuyo amor incondicional, apoyo constante y profunda sabiduría han constituido los cimientos mi vida. Ustedes han sido la fuente de mi determinación y esfuerzo, y su respaldo continuo ha sido la base sobre la cual he construido este proyecto. Valoro inmensamente su presencia en cada etapa de mis estudios, ofreciéndome orientación y apoyo con amor y firmeza.

Todo este esfuerzo, sacrificio y dedicación está dirigido a ustedes, mi amada familia.

Mario Vladimir Chauca Arevalo

Dedico este trabajo de titulación a mis queridos padres, quienes siempre han estado a mi lado con su apoyo incondicional y confianza. En los momentos de incertidumbre, su amor y aliento han sido mi mayor fuente de fortaleza y motivación. Este logro refleja no solo mi esfuerzo, sino también el impacto positivo de su dedicación y apoyo constante. Gracias por ser el pilar en mi vida y por estar siempre presentes en cada paso de este viaje.

Brian Soto Noboa

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en la realización de este proyecto de titulación. En primer lugar, agradezco a mis padres, cuyo apoyo incondicional y confianza en mí han sido la base de mi perseverancia.

Mi más profundo agradecimiento al Doctor Víctor Huilcapi, mi tutor, por su guía experta y paciencia durante todas las etapas del trabajo. Su conocimiento y consejos han sido esenciales para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco también a mis amigos y colegas, quienes me han brindado su apoyo y comprensión en momentos de duda. Sus palabras de aliento y compañerismo han sido invaluable.

Finalmente, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme los recursos y el entorno académico necesarios para llevar a cabo nuestro Proyecto de Titulación.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por su contribución a este logro.

Con aprecio,

Brian Soto Noboa

En primer lugar, agradezco a Dios, mi guía y fortaleza, quien me ha brindado sabiduría y constancia para desarrollar mi proyecto de graduación.

A mis queridos padres, quienes con su esfuerzo diario y amor incondicional han sido los pilares de mi vida. Su ejemplo de lucha y dedicación me ha inspirado a alcanzar esta meta.

A mis hermanas, por su cariño y apoyo incondicional han sido vitales en este trayecto, complementando mi vida y motivándome a seguir adelante. Gracias por ser mi fuente de inspiración y por darme el impulso necesario para alcanzar mis metas.

A todas aquellas personas que estuvieron presentes a lo largo de mi formación académica, especialmente a mis maestros, por impartirme no solo conocimientos académicos, sino también importantes lecciones de vida.

De manera especial, extiendo mi agradecimiento a nuestro distinguido tutor de proyecto de titulación, Ph.D Victor Huilcapi, por compartir sus valiosos conocimientos y experiencia, fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Mario Vladimir Chauca Arevalo

RESUMEN

El presente proyecto de titulación se enfoca en el diseño e implementación de un Controlador en el Espacio de Estados para la regulación de temperatura en una planta didáctica de control de procesos (EPC) utilizando la plataforma LabVIEW. Esta metodología permite describir con precisión el comportamiento dinámico del sistema mediante variables de estado, optimizando el control de temperatura al analizar y ajustar las interacciones entre diversas variables internas, proporcionando una solución robusta y eficiente en comparación con las técnicas tradicionales de control. El proyecto contempla la representación de la planta didáctica a través de ecuaciones en el Espacio de Estados, considerando variables críticas como la temperatura y el voltaje. Se desarrolló un controlador especializado para regular estas variables y lograr un rendimiento óptimo, aplicando el método de Ackermann para la ubicación de polos en el dominio temporal, lo que garantiza la estabilidad del sistema.

La destinación del controlador es mantener la temperatura de la planta didáctica de forma constante, adaptándose a los requerimientos específicos del proceso. LabVIEW proporciona una interfaz gráfica sofisticada que simplifica la observación y la configuración de parámetros, permitiendo supervisar y mejorar el rendimiento del sistema en tiempo real. El modelado y control integral del sistema, tomando en cuenta las relaciones entre los componentes de estado, facilita un control exacto y adaptable a diversas condiciones operativas.

Se realizó una comparación exhaustiva de los controladores PID y de Espacio de Estados para analizar su rendimiento en situaciones reales y en diversas condiciones. Los resultados obtenidos fueron representados gráficamente para examinar las ventajas y desventajas de cada método, subrayando la superioridad del Controlador en el Espacio de Estados en términos de precisión y adaptabilidad.

En conclusión, este proyecto no solo demuestra la viabilidad práctica del Controlador en el Espacio de Estados para la regulación de temperatura, sino que también resalta su potencial para mejorar la formación y práctica en el control automático de sistemas dinámicos, proponiendo una alternativa avanzada y estratégica al controlador PID tradicional.

Palabras Clave: Variables de Estado, Espacio de Estados, Estabilidad , Controlador PID, Labview, Asignación de Polos.

ABSTRACT

The present graduation project focuses on the design and implementation of a State Space Controller for temperature regulation in an educational process control plant (EPC) using the LabVIEW platform. This methodology allows for precise description of the system's dynamic behavior through state variables, optimizing temperature control by analyzing and adjusting the interactions between various internal variables, providing a robust and efficient solution compared to traditional control techniques.

The project involves representing the educational plant through State Space equations, considering critical variables such as temperature and voltage. A specialized controller was developed to regulate these variables and achieve optimal performance, applying the Ackermann method for pole placement in the time domain, ensuring system stability.

The controller's purpose is to maintain the temperature of the educational plant consistently, adapting to the specific requirements of the process. LabVIEW provides a sophisticated graphical interface that simplifies the observation and configuration of parameters, enabling real-time monitoring and enhancement of system performance.

The comprehensive modeling and control of the system, taking into account the relationships between state components, facilitates precise and adaptable control under various operating conditions.

A thorough comparison of PID and State Space controllers was conducted to analyze their performance in real-world situations and under different conditions. The obtained results were graphically represented to examine the advantages and disadvantages of each method, highlighting the superiority of the State Space Controller in terms of accuracy and adaptability.

In conclusion, this project not only demonstrates the practical feasibility of the State Space Controller for temperature regulation but also emphasizes its potential to enhance education and practice in automatic control of dynamic systems, proposing an advanced and strategic alternative to the traditional PID controller.

Keywords: State Variables, State Space, Stability, PID Controller, LabVIEW, Pole Placement.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA.....	2
1.1 Justificación	3
1.2 Delimitación del Problema	3
1.3 Objetivo general.....	4
1.4 Objetivos específicos	4
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1 Entrenador de Planta de Control EPC.....	5
2.1.1 Diagrama Esquemático de la planta EPC.....	6
2.2 Tarjeta NI myDAQ	7
2.3 Software LabView	8
2.3.1 Capacidades y Aplicaciones de LabVIEW	8
2.3.2 Integración, Programación y Beneficios Educativos de LabVIEW	10
2.4 Software Matlab	11
2.4.1 Desarrollo e Implementación de Algoritmos	11
2.4.2 Análisis de Datos y Visualización	12
2.4.3 Identificación y Modelado de Sistemas	12
2.4.4 Integración con Hardware y Desarrollo de Interfaces.....	13
2.5 Led.....	13
2.5.1 Características clave de los LEDs incluyen:	14
2.5.2 Control de Temperatura en Plantas Didácticas	14
2.6 Sensor de Temperatura LM35.....	15
2.6.1 Principio de Funcionamiento	15
2.6.8 Aplicaciones del LM35.....	16
2.6.9 Consideraciones en el Uso del LM35	16
2.7 Controlador PID.....	17
2.7.1 Sintonización de Parámetros PID.....	17
2.7.2 Aplicaciones del Control PID	18
2.8 Controlador en Espacio de Estados.....	19

2.8.1 Fundamentos del Espacio de Estados	19
2.8.2 Representación de Sistemas en Espacio de Estados	20
2.8.3 Aplicaciones del Controlador por Espacio de Estados	20
2.9 Métricas Claves en el Análisis de la Respuesta Temporal.....	20
2.9.1 Tiempo de Estabilización	21
2.9.2 Overshoot	21
3. MARCO METODOLÓGICO.....	22
3.1 Metodología para el diseño del controlador en Espacio de Estados	23
3.2 Metodología para el diseño del controlador PID	24
3.3 Pruebas y análisis comparativo de la eficacia de dos Controladores	25
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
4.1 Identificación del modelo de la Planta EPC.....	26
4.1.1 Primera Identificación y Análisis de Modelos de Temperatura.....	27
4.1.2 Segunda Identificación y Análisis de Modelos de Temperatura.....	28
4.1.2 Selección del modelo para nuestro controlador	29
4.2 Diseño del Controlador en el Espacio de Estados:.....	30
4.2.1 Asignación de polos	30
4.2.2 Principio del Modelo Interno	31
4.2.3 Determinación de la matriz K utilizando la fórmula de Ackermann.	32
4.3 Implementación en LabVIEW	34
4.4 Análisis en del controlador en Espacio de estados.....	36
4.4.1 Escenario 1 Espacio Estados 1 Setpoint 25°C	36
4.4.2 Escenario 2 Espacio Estados Setpoint 30°C	37
4.4.3 Escenario 3 Espacio Estados Setpoint 35°C	38
4.4.4 Escenario 4 Espacio Estados Setpoint 40°C	39
4.4.5 Escenario 5 Espacio Estados Setpoint 45°C	40
4.4.6 Escenario 6 Espacio Estados Setpoint 50°C	41
4.4.7 Escenario 7 Espacio Estados Setpoint 55°C	42
4.5 Análisis en los escenarios seleccionados del controlador en PID.....	43
4.5.1 Escenario 1 PID Setpoint 25°C	43
4.5.2 Escenario 2 PID Setpoint 30°C	44

4.5.3 Escenario 3 PID Setpoint 35°C	45
4.5.4 Escenario 4 PID Setpoint 40°C	46
4.5.5 Escenario 5 PID Setpoint 45°C	47
4.5.6 Escenario 6 PID Setpoint 50°C	48
4.5.7 Escenario 7 PID Setpoint 55°C	49
4.6 Análisis comparativo de los controladores PID y Espacio de Estados	50
4.6.1 Comparativa Setpoint 28-30°C	50
4.6.2 Comparativa Setpoint 30-35°C	51
4.6.3 Comparativa Setpoint 35-40°C	51
4.6.4 Comparativa Setpoint 30-40°C	52
4.7 Resultados de Pruebas y Análisis de Datos.....	53
4.7.1 Resultados de prueba con el controlador de Espacio de Estados.....	53
4.7.2 Resultados de prueba con el controlador PID.....	54
4.7.3 Resultados de prueba comparativa Espacio de Estados y PID	55
4.8 Guía o manual de Prácticas de Laboratorio	56
4.8.1 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador en el Espacio de Estados mediante LabVIEW. 56	
4.8.2 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador PID mediante LabVIEW.	60
4.8.3 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador en el Espacio de Estados mediante LabVIEW. 65	
CRONOGRAMA.....	70
PRESUPUESTO	71
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS.....	74
ANEXOS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Entrenador de Planta de Control EPC	5
Figura 2 Diagrama esquemático de la Planta EPC.....	6
Figura 3 NI myDAQ	7
Figura 4 Entorno de desarrollo de control y diseño LabView	8
Figura 5 LabVIEW Grafical Programming	9
Figura 6 Entorno de desarrollo de Matlab.....	11
Figura 7 System Identification Tool	12
Figura 8 Led	13
Figura 9 LM35	15
Figura 10 Diagrama de un controlador PID.....	17
Figura 11 Diagrama de un controlador por Espacio de Estados	19
Figura 12 Diagrama de Flujo para la validación del Controlador de estados	23
Figura 13 Diagrama de Flujo para la validación del Controlador PID	24
Figura 14 Data Base EPC.....	26
Figura 15 System Identification Temp.....	27
Figura 16 Best Fit Data base Temp.....	27
Figura 17 System Identification Temp1.....	28
Figura 18 Best Fit Data base Temp1.....	28
Figura 19 Diagrama de control en espacio de estados	30
Figura 20 Bloque Math Scrip de LabVIEW	34
Figura 21 Acción de control y la implementación del Espacio de Estados	35
Figura 22 Interfaz Grafica del Controlador.....	35
Figura 23 Análisis de temperatura en el Escenario 1 Espacio de Estados	36
Figura 24 Análisis Temp. en Espacio de Estados 1 con Perturbación	36
Figura 25 Análisis de temperatura en el Escenario 2 Espacio de Estados	37
Figura 26 Análisis Temp. en Espacio de Estados 2 con Perturbación	37
Figura 27 Análisis de temperatura en el Escenario 3 Espacio de Estados	38
Figura 28 Análisis Temp. en Espacio de Estados 3 con Perturbación	38
Figura 29 Análisis de temperatura en el Escenario 4 Espacio de Estados	39
Figura 30 Análisis Temp. en Espacio de Estados 4 con Perturbación	39
Figura 31 Análisis de temperatura en el Escenario 5 Espacio de Estados	40
Figura 32 Análisis Temp. en Espacio de Estados 5 con Perturbación	40
Figura 33 Análisis de temperatura en el Escenario 6 Espacio de Estados	41
Figura 34 Análisis Temp. en Espacio de Estados 6 con Perturbación	41
Figura 35 Análisis de temperatura en el Escenario 7 Espacio de Estados	42
Figura 36 Análisis Temp. en Espacio de Estados 7 con Perturbación	42
Figura 37 Análisis de temperatura en el Escenario 1 PID	43
Figura 38 Análisis Temp. en Controlador PID 1 con Perturbación	43
Figura 39 Análisis de temperatura en el Escenario 2 PID	44

Figura 40 Análisis Temp. en Controlador PID 2 con Perturbación	44
Figura 41 Análisis de temperatura en el Escenario 3 PID	45
Figura 42 Análisis Temp. en Controlador PID 3 con Perturbación	45
Figura 43 Análisis de temperatura en el Escenario 4 PID	46
Figura 44 Análisis Temp. en Controlador PID 4 con Perturbación	46
Figura 45 Análisis de temperatura en el Escenario 5 PID	47
Figura 46 Análisis Temp. en Controlador PID 5 con Perturbación	47
Figura 47 Análisis de temperatura en el Escenario 6 PID	48
Figura 48 Análisis Temp. en Controlador PID 6 con Perturbación	48
Figura 49 Análisis de temperatura en el Escenario 7 PID	49
Figura 50 Análisis Temp. en Controlador PID 7 con Perturbación	49
Figura 51 Análisis de la comparativa 1 entre el Espacio de Estados y PID.....	50
Figura 52 Análisis de la comparativa 2 entre el Espacio de Estados y PID.....	51
Figura 53 Análisis de la comparativa 3 entre el Espacio de Estados y PID.....	52
Figura 54 Análisis de la comparativa 4 entre el Espacio de Estados y PID.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de los Modelos Identificados.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2 Recolección de datos del controlador de Espacio de Estados.....	53
Tabla 3 Recolección de datos del controlador de PID	54
Tabla 4 Recolección de datos de la comparativa de los dos controladores	55
Tabla 5 Diagrama de Gantt del cronograma de actividades para la elaboración del Proyecto de Titulación.....	70
Tabla 6 Estimación de presupuesto para el desarrollo del Proyecto de Titulación.....	71

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de titulación se enfoca en el diseño e implementación de un Controlador en el Espacio de Estados para la regulación de temperatura en una planta didáctica de control de procesos (EPC) utilizando LabVIEW. La elección de una planta didáctica como caso de estudio se fundamenta en su relevancia educativa y su idoneidad para la exploración y validación de las propiedades del control en el Espacio de Estados.

Se llevó a cabo la implementación del Controlador mediante LabVIEW, una herramienta de diseño que fusiona la monitorización virtual con sistemas de control automatizado., funcionando como un centro de operaciones estratégico. El principal desafío de este proyecto fue diseñar un controlador capaz de mantener la temperatura estable en diversas condiciones de operación.

A lo largo de este proyecto, se exploran los elementos técnicos necesarios, los resultados obtenidos en experimentos y sus aplicaciones prácticas de la solución planteada, con el propósito de aportar al desarrollo de la comprensión en el campo del control de sistemas dinámicos. Este estudio propone el uso del Controlador en el Espacio de Estados como una opción al Controlador PID, destacando su capacidad para controlar sistemas dinámicos de manera más precisa, al considerar tanto la conexión entrada-salida como la composición interna del sistema.

Además, se llevó a cabo una comparación detallada entre el Controlador en el Espacio de Estados propuesto y un Controlador PID, resaltando las ventajas de cada uno en diversas condiciones de ajuste. Los hallazgos derivados del uso de LabVIEW y MATLAB/Simulink respaldan la viabilidad práctica del Controlador propuesto, demostrando respuestas consistentes y fiables.

La estructura de este trabajo se organiza de la siguiente manera: primero, se presenta una revisión teórica de los principios de control en el Espacio de Estados y el funcionamiento de LabVIEW. A continuación, se detalla el diseño e implementación del Controlador, seguidos de las pruebas experimentales realizadas y el análisis de los resultados alcanzados. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones, subrayando la importancia de este enfoque en la mejora de la educación y práctica en el control automático de sistemas dinámicos.

1. PROBLEMA

En el ámbito de la investigación científica y la educación, el control de temperatura es un elemento esencial en diversos tipos de procesos y experimentos [1]. La utilización de plantas didácticas como la Planta Didáctica de Control (EPC), proporciona un entorno controlado para estudiar y comprender los principios de control en sistemas dinámicos [2].

Sin embargo, esta planta didáctica viene configurada con un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para la regulación de temperatura. Si bien los controladores PID son ampliamente utilizados estos presentan limitaciones en termino de desempeño y versatilidad en comparación con los controladores en Espacio de Estados. En el contexto de la teoría de control contemporánea, las variables de estado son fundamentales, ya que permiten representar el estado dinámico del sistema en un momento dado y proporcionan información esencial para evaluar su controlabilidad [3].

Además, el desarrollo de un controlador en el Espacio de Estados ofrece una serie de beneficios significativos en comparación con los controladores PID tradicionales [4]. Uno de estos beneficios es la capacidad de diseñar e implementar observadores de estado, también conocidos como observadores de Kalman, que permiten estimar el estado interno del sistema en tiempo real a partir de las medidas disponibles [5],[6].

Esta técnica resulta especialmente útil en sistemas donde no todos los estados son directamente medibles, mejorando así la precisión y la eficiencia del control [7].

Además, los controladores en el Espacio de Estados permiten un diseño más flexible y sofisticado, lo que facilita la adaptación a diversos tipos de sistemas y la implementación de estrategias de control más avanzadas [7].

Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar e implementar un controlador en el Espacio de Estados para el control de temperatura en la planta EPC [2]. Este proyecto busca fortalecer el campo de la investigación y la educación, ofreciendo un enfoque innovador y efectivo para el control de temperatura en sistemas dinámicos, con posibles aplicaciones en diversas áreas de la ciencia y la tecnología [3].

1.1 Justificación

En el ámbito de la regulación de temperatura de una planta didáctica de control de procesos (EPC), este proyecto permite avanzar en la investigación científica en el área de la ingeniería de control de sistemas dinámicos, debido a su capacidad de aplicar métodos de control modernas, como el control óptimo o el control predictivo, que requieren un modelo en el Espacio de Estados para su implementación [8]. Estos avances son cruciales para áreas como la ingeniería de procesos, la robótica y la automática, donde el control de temperatura juega un papel fundamental [9].

Además, la aplicación de un controlador en el Espacio de Estados en la EPC aportará para brindar a los estudiantes la posibilidad de entender y aplicar conceptos avanzados de control moderno, mediante las practicas resultantes de este proyecto de Titulación. Proporcionando una comprensión más detallada de los fundamentos de control enfrentando los desafíos de la aplicación de controladores en el campo de la automatización y la instrumentación [9].

1.2 Delimitación del Problema

El proyecto se contextualiza en el área de la investigación científica y la educación, específicamente en el control de temperatura en sistemas dinámicos utilizando la Planta Didáctica de Control (EPC) de La Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil periodo 2024. El análisis se enfocará en la aplicación de teorías modernas de control, destacando el uso de controladores en el Espacio de Estados.

OBJETIVOS

1.3 Objetivo general

Diseñar e implementar un Controlador en el Espacio de Estados para el control de temperatura en una planta didáctica (EPC) usando LabVIEW.

1.4 Objetivos específicos

- Identificar un modelo matemático que caracterice la dinámica de la temperatura de una planta didáctica EPC.
- Diseñar un algoritmo de control en el espacio de estados para estabilizar la temperatura en una planta EPC.
- Comparar la respuesta del controlador en el espacio de estados versus un controlador PID para evaluar sus desempeños para seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Entrenador de Planta de Control EPC

El Entrenador de Planta de Control (EPC) es una herramienta educativa y de investigación crucial en el ámbito de la ingeniería de control y automatización como se contempla en la Figura 1. Esta planta electrónica avanzada está equipada con una gama diversa de sensores y actuadores, que permite el cálculo y el control de variables como temperatura, velocidad y posición. Los sensores miden parámetros físicos esenciales, mientras que los actuadores gestionan señales analógicas, digitales y trenes de pulsos, replicando componentes comunes en sistemas industriales reales. La capacidad del EPC para manejar estas variables y señales lo convierte en una plataforma ideal para la simulación y el análisis de procesos industriales en un entorno seguro y controlado [10].

El uso de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se lleva a cabo mediante un ordenador, lo cual es una característica esencial. Esta conexión permite la recopilación, procesamiento y análisis en tiempo real de los datos recogidos de los sensores, facilitando la ejecución y puesta a prueba de algoritmos de control. El programa asociado con la DAQ proporciona un entorno para diseñar, ajustar y validar técnicas de control, permitiendo a los usuarios experimentar con diferentes configuraciones y parámetros del sistema antes de su aplicación en entornos reales. Esta funcionalidad es esencial para repotenciar el desarrollo y mejorar la precisión de los sistemas de control [10].

Figura 1 Entrenador de Planta de Control EPC

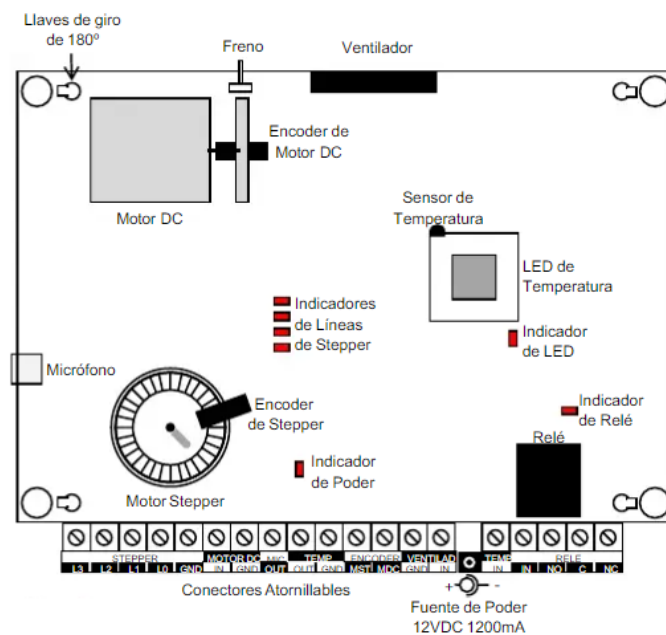


Nota: Ejemplo de un entrenador de Planta de Control EPC [11].

2.1.1 Diagrama Esquemático de la planta EPC

El diagrama de la Planta EPC (Entrenador de Planta de Control) ofrece una visión clara de la estructura y funcionamiento del sistema. Representa componentes clave como sensores, controladores, actuadores e interfaces de usuario como se puede estimar en la Figura 2. Los sensores, que recogen datos del proceso, se conectan a un controlador que ajusta los actuadores, como resistencias o válvulas, para mantener el proceso bajo control. Las interfaces de usuario permiten la interacción y monitoreo del sistema en tiempo real. Este diagrama facilita la comprensión de cómo los diferentes elementos del sistema trabajan juntos para gestionar y controlar el proceso, proporcionando una herramienta educativa eficaz para el aprendizaje práctico en ingeniería de control [10], [11].

Figura 2 Diagrama esquemático de la Planta EPC

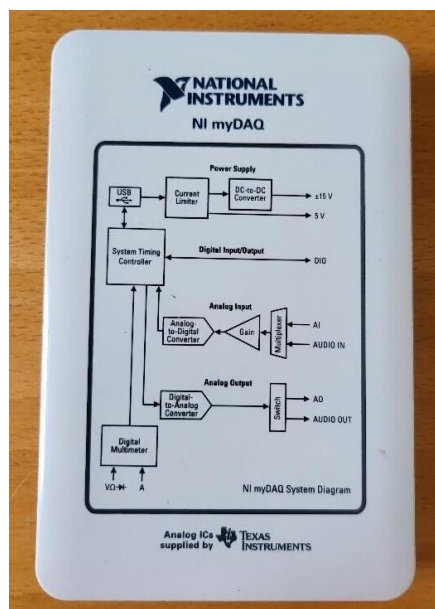


Nota: Diagrama del entrenador de Planta de Control EPC [11].

2.2 Tarjeta NI myDAQ

El NI myDAQ de National Instruments es un dispositivo portátil de adquisición de datos y control, diseñado específicamente para entornos educativos como se representa en la Figura 3. Proporciona una solución integral para la adquisición de datos, la generación de señales y el control de sistemas, siendo ideal para estudiantes y profesionales que realizan experimentos fuera del laboratorio tradicional. Entre sus principales características se encuentran las entradas y salidas analógicas y digitales, que habilitan la conexión de sensores y actuadores, el generador de funciones y osciloscopio integrados para la generación y visualización de señales eléctricas, y un multímetro para la evaluación de voltaje, corriente y resistencia. Su compatibilidad con el software LabVIEW permite el desarrollo de aplicaciones personalizadas de adquisición y control [12]. El NI myDAQ se utiliza en laboratorios de electrónica para diseñar y probar circuitos, en el control de procesos para implementar y probar algoritmos de control, en la adquisición de datos de sensores y en la proyección de sistemas de control. Su portabilidad y facilidad de uso proporcionan a los estudiantes una plataforma práctica para adquirir experiencia en la obtención de datos y en el respectivo control de sistemas, mejorando significativamente su preparación profesional [13].

Figura 3 NI myDAQ



Nota: Ejemplo de Tarjeta NI USB-6009 [12].

2.3 Software LabView

LabVIEW es un ambiente de construcción gráfica diseñado por National Instruments. Este software emplea la programación por flujo de datos para la creación de sistemas y aplicaciones [12]. LabVIEW se compone de dos componentes principales: el "front panel" y el "block diagram". El "front panel" permite visualizar y controlar las diferentes variables y gráficos, ofreciendo una interfaz interactiva para el usuario [14]. Por otro lado, el "block diagram" (diagrama de bloques) es donde se desarrolla la lógica de programación utilizando nodos y cables que representan las funciones y el flujo de datos, respectivamente, como se ilustra en la Figura 4. Este enfoque facilita el diseño de interfaces de usuario interactivas mediante herramientas y objetos visuales, simplificando así la creación de aplicaciones complejas [7].

Figura 4 Entorno de control y diseño LabView



Nota: Ejemplo de Software LabView [15].

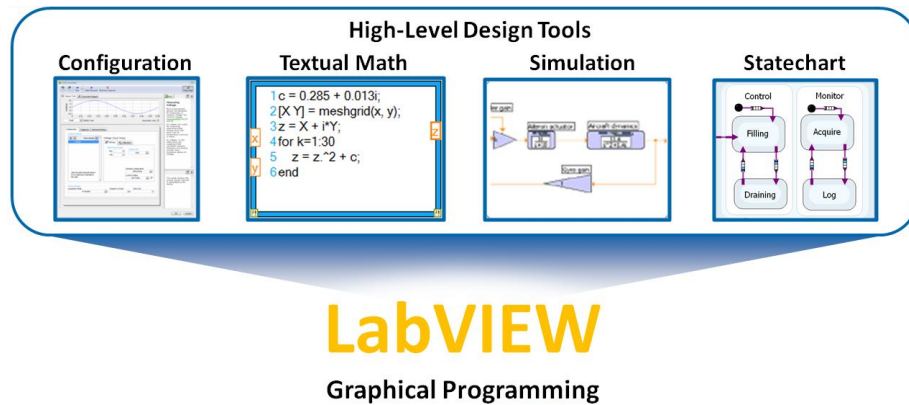
LabVIEW ofrece una interfaz intuitiva para la conexión y control de una diversa gama de hardware de adquisición de información, que incluye dispositivos de medición, sensores y actuadores. Esta característica convierte a LabVIEW en una herramienta extremadamente eficiente para la implementación de sistemas de supervisión y control en tiempo real, mejorando la precisión y la fiabilidad de las operaciones. El ajuste con diferentes estándares de comunicación y la capacidad de integrar múltiples dispositivos permiten un control centralizado y eficiente de los sistemas [16].

2.3.1 Capacidades y Aplicaciones de LabVIEW

Concebido inicialmente para el desarrollo de sistemas de simulación virtual, LabVIEW proporciona un entorno para la simulación y el control adecuado de instrumentos y dispositivos físicos mediante software como se puede observar en la Figura 5. Esta habilidad posibilita el desarrollo eficiente de sistemas de pruebas y cálculo, además de la automatización de procesos en entornos industriales. Al simular los instrumentos en un entorno virtual, se optimizan tanto

el tiempo como los recursos necesarios para realizar tareas complejas, reduciendo costos y aumentando la flexibilidad en el diseño y prueba de sistemas [17].

Figura 5 LabVIEW Graphical Programming



Nota: Ejemplo de LabView enfocado al control y simulación de dispositivos [18].

LabVIEW proporciona una interfaz intuitiva y versátil para la conexión y control de una amplia selección de equipos para recolección de datos. Esto incluye equipos de medición, sensores y actuadores, lo que conforma de LabVIEW una herramienta extremadamente eficaz para la implementación de sistemas de control y monitoreo en tiempo real [16]. Esta capacidad de interactuar con diversos dispositivos mejora significativamente la precisión y fiabilidad de las operaciones, asegurando que los datos recogidos y las acciones ejecutadas sean exactos y oportunos. Además, LabVIEW es compatible con diferentes estándares de comunicación, lo que permite integrar múltiples dispositivos de forma coherente y centralizada. Esto no solo facilita el control eficiente de los sistemas, sino que también simplifica el proceso de configuración y gestión de la red de dispositivos conectados [17].

Inicialmente creado para el despliegue de sistemas de instrumentación virtual, LabVIEW facilita la simulación y el control de dispositivos e instrumentos físicos mediante software. Esta capacidad permite construir de manera eficiente sistemas de prueba y medición, así como automatizar procesos en entornos industriales [16]. Al simular los instrumentos en un entorno virtual, se optimizan tanto el tiempo como los recursos necesarios para realizar tareas complejas, reduciendo costos y aumentando la flexibilidad en el diseño y prueba de sistemas. La instrumentación virtual de LabVIEW además de optimizar el rendimiento operativo, también proporciona una plataforma segura y controlada para la experimentación y la formación, permitiendo a los usuarios desarrollar y probar soluciones sin la necesidad de disponer de equipos físicos costosos [17].

2.3.2 Integración, Programación y Beneficios Educativos de LabVIEW

Además de sus capacidades de hardware, LabVIEW se distingue por su habilidad de integración con otros software y herramientas de ingeniería como MATLAB y Simulink, lo que permite desarrollar soluciones más complejas y robustas combinando las fortalezas de diferentes plataformas en un único entorno cohesivo [19]. Esta interoperabilidad facilita la transferencia de datos y la implementación de algoritmos avanzados, mejorando la eficiencia y la efectividad de los proyectos. Una de las ventajas más significativas de LabVIEW es su enfoque en la programación gráfica, utilizando diagramas de bloques en lugar de código textual, lo que optimiza el método de desarrollo y facilita la comprensión y el mantenimiento de los programas [20]. Este enfoque es especialmente útil en proyectos colaborativos, reduciendo la posibilidad de errores y permitiendo a los desarrolladores centrarse en la lógica del sistema.

En el ámbito educativo, LabVIEW es ampliamente utilizado para la instrucción de principios de ingeniería y control, proporcionando una interfaz intuitiva y capacidades de simulación que permiten a los estudiantes experimentar con sistemas complejos en un entorno seguro y controlado [21]. Este enfoque interactivo prepara mejor a los ingenieros y científicos del mañana para enfrentar los desafíos del mundo real, proporcionando una comprensión práctica de los conceptos teóricos. Además, LabVIEW permite la realización de interfaces de usuario personalizadas, mejorando la interacción con el sistema y el manejo por parte del usuario, y permitiendo la adaptación de las interfaces a necesidades específicas, lo que incrementa la eficiencia y la usabilidad del sistema.

En el contexto de proyectos de investigación, LabVIEW proporciona una plataforma flexible y escalable que permita ajustarse a los requisitos particulares de cada estudio. Su capacidad para gestionar grandes cantidades de datos y llevar a cabo análisis detallados lo convierte en una herramienta invaluable para los investigadores que buscan obtener resultados precisos y significativos [21]. La facilidad de integración con otros sistemas y la posibilidad de automatizar experimentos y recopilación de datos hacen de LabVIEW una opción preferida en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería.

2.4 Software Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) es una herramienta computacional integral y versátil, ampliamente utilizada en ingeniería y campos científicos aplicados para el diseño de modelos, análisis y simulación de sistemas dinámicos [21]. Su lenguaje de programación de alto nivel y su extensa biblioteca de funciones permiten a los usuarios realizar operaciones complejas de manera eficiente y efectiva. MATLAB es particularmente valioso en la identificación de sistemas, un proceso que implica construir modelos matemáticos basados en datos medidos. Con el System Identification Toolbox, facilita la creación, validación y optimización de modelos de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales [22]. La capacidad de este software para procesar datos y aplicar técnicas avanzadas de estimación y ajuste de parámetros lo hace indispensable para investigadores y profesionales que buscan mejorar el rendimiento y la precisión de los sistemas de control, como se ilustra en la Figura 6.

Figura 6 Entorno de desarrollo de Matlab



Nota: Ejemplo de Matlab destinado a la Identificación de sistemas. [23]

2.4.1 Desarrollo e Implementación de Algoritmos

MATLAB es excepcional para el desarrollo y la implementación de algoritmos complejos. Su entorno de programación permite a ingenieros y científicos diseñar, probar y optimizar algoritmos para una variedad de aplicaciones, como la gestión de señales, el análisis de imágenes y el aprendizaje automático. La plataforma brinda un grupo de herramientas y funciones que facilitan la creación de algoritmos innovadores y su integración en aplicaciones en tiempo real. Esta flexibilidad hace que MATLAB sea indispensable para la innovación tecnológica en diversas industrias. Los usuarios pueden adaptar y ajustar algoritmos según sus requisitos particulares, lo que potencia la capacidad de MATLAB para enfrentar desafíos complejos en múltiples campos [24], [25].

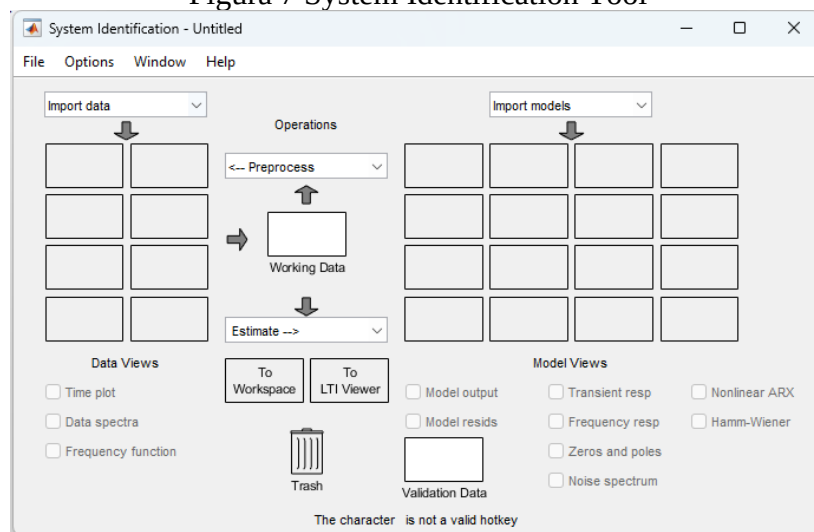
2.4.2 Análisis de Datos y Visualización

El análisis de datos y la visualización son áreas donde MATLAB brilla con luz propia. Ofrece potentes herramientas para procesar grandes volúmenes de datos y aplicar técnicas estadísticas avanzadas. Los usuarios pueden generar gráficos detallados en 2D y 3D, lo que facilita la interpretación y comunicación de resultados de manera efectiva. Esta capacidad es crucial para la formulación de decisiones informadas en proyectos de investigación y desarrollo. La visualización interactiva en MATLAB permite explorar datos de forma intuitiva, ayudando a descubrir patrones y tendencias ocultas que pueden no ser evidentes en un análisis superficial [24], [25].

2.4.3 Identificación y Modelado de Sistemas

MATLAB destaca en la identificación y modelado de sistemas dinámicos. Utilizando el System Identification Toolbox, los usuarios pueden construir, validar y optimizar modelos de sistemas basados en datos experimentales como se aprecia en la Figura 7. Este proceso es fundamental para optimizar la exactitud y el rendimiento de los sistemas de control. La capacidad de MATLAB para probar y ajustar modelos en un entorno simulado permite anticipar y resolver problemas previos a su aplicación en escenarios reales, además Simulink permite realizar pruebas bajo diversas condiciones, minimizando riesgos y optimizando diseños antes de la implementación física [26], [27].

Figura 7 System Identification Tool



Nota: Captura de la interfaz por los autores

2.4.4 Integración con Hardware y Desarrollo de Interfaces

MATLAB ofrece una integración eficaz con hardware para la recolección de información y el control en tiempo real. Los usuarios pueden conectar sensores, actuadores y otros equipos de medición, lo cual es clave para aplicaciones en automatización industrial, robótica y sistemas embebidos. Esta capacidad de comunicación en tiempo real permite desarrollar sistemas de control y monitoreo altamente eficientes y precisos. Además, MATLAB proporciona herramientas para desarrollar interfaces de usuario personalizadas, mejorando la interacción con aplicaciones y sistemas. Las interfaces pueden ser diseñadas para ser intuitivas y funcionales, facilitando el control eficiente de procesos [28], [29].

2.5 Led

Un LED (Diodo Emisor de Luz) es un componente semiconductor que genera luz cuando una corriente eléctrica lo atraviesa. El fundamento operativo del Led se sustenta en el proceso de la electroluminiscencia, un fenómeno en el cual los electrones se recombinan con huecos en el semiconductor, generando energía en forma de fotones [30]. Los Leds, como se muestra en la Figura 8, están fabricados principalmente con materiales como el arseniuro de galio (GaAs) o el nitruro de galio (GaN), que determinan el color de la luz emitida. En esta aplicación particular, el Led se utiliza no solo para emitir luz, sino también para generar calor, aumentando así la temperatura del sensor al que está asociado [31].

Figura 8 Led



Nota: Ejemplo de un led emisor de luz [32].

2.5.1 Características clave de los LEDs incluyen:

Los LEDs destacan por su alta eficiencia energética en comparación con las fuentes de luz convencionales. Esta propiedad no solo disminuye el consumo de energía, sino que también reduce significativamente la generación de calor en aplicaciones tradicionales [33]. Sin embargo, en este contexto, la eficiencia térmica del Led puede ser aprovechada para transferir calor al sensor. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde el control preciso de la temperatura es crucial, ya que los Leds pueden proporcionar una fuente de calor estable y controlada [31].

Los Leds tienen una vida útil considerablemente más larga que las bombillas incandescentes, gracias a su diseño sólido y la ausencia de filamentos. Esto implica que, incluso cuando se utilizan para aplicaciones que involucran generación de calor, los Leds continúan operando de manera fiable durante un extenso período [34]. La longevidad de los leds disminuye la necesidad de reemplazos frecuentes, lo que a su vez reduce los costos de mantenimiento y mejora la continuidad operativa de los sistemas en los que se integran [33].

Aunque los Leds están diseñados principalmente para emitir luz, parte de la energía eléctrica se convierte en calor. Este calor puede ser dirigido hacia un sensor para aumentar su temperatura de operación. Es fundamental gestionar el calor generado para evitar el sobrecalentamiento del Led y garantizar una transferencia térmica eficiente al sensor [35]. Esto puede lograrse mediante el uso de disipadores de calor y materiales de conducción térmica adecuados, asegurando así un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada del dispositivo [36].

2.5.2 Control de Temperatura en Plantas Didácticas

En el contexto de plantas didácticas, los LEDs pueden utilizarse como fuentes de calor controladas para estudiar y demostrar principios de transferencia de calor y control de temperatura. La capacidad de ajustar con precisión la salida de calor de los LEDs permite realizar experimentos detallados y obtener datos precisos para el modelado y análisis de sistemas térmicos [37].

Los LEDs pueden integrarse con sistemas de monitoreo que utilizan sensores de temperatura para ajustar y mantener condiciones térmicas específicas. Esto es particularmente útil en aplicaciones de investigación y desarrollo donde la estabilidad térmica es crítica. La

integración de LEDs en estos sistemas permite una respuesta rápida y eficiente a los cambios de temperatura, mejorando el control y la fiabilidad del sistema [34].

2.6 Sensor de Temperatura LM35

El LM35 es un sensor de temperatura analógico frecuentemente empleado en medición de temperatura caracterizado por su alta precisión y facilidad de uso. Este sensor ofrece una salida de voltaje lineal proporcional a la temperatura en grados Celsius como se observa en la Figura 9, lo que lo transforma en un recurso vital en sistemas de monitoreo y control de temperatura [38].

Figura 9 LM35



Nota: Ejemplo de un Sensor de temperatura LM35 [39].

2.6.1 Principio de Funcionamiento

El LM35 está construido sobre la base de un transistor de silicio que actúa como un termómetro. La temperatura se mide mediante la variación en la caída de voltaje sobre un transistor, que se convierte en una señal de voltaje analógica. Este voltaje varía de manera lineal con respecto a la temperatura en grados Celsius [38].

El LM35 es un sensor de temperatura basado en un transistor de silicio que funciona como un termómetro, midiendo la temperatura a través de la variación en la caída de voltaje sobre el transistor, convirtiéndose así en una señal de voltaje analógica [40], [41]. La salida del LM35 es de 10 mV por cada grado Celsius, lo que facilita la conversión directa del voltaje medido a una lectura de temperatura sin cálculos complejos; por ejemplo, a 0 °C, la salida es de 0 mV, y a 25 °C, es de 250 mV [40]. Este sensor está calibrado internamente para proporcionar una salida precisa y lineal, eliminando la necesidad de ajustes adicionales en la mayoría de las aplicaciones [[41]. Su rango de medida abarca de -55 °C a +150 °C, haciéndolo idóneo para diversas operaciones, desde sistemas de control de temperatura industriales hasta monitoreo ambiental. Ofrece una alta precisión de ± 0.5 °C en el rango de 0 °C a 100 °C,

garantizando lecturas confiables [40]. Además, el LM35 consume muy poca energía, alrededor de 60 μA en condiciones normales, lo que lo hace adecuado para aplicaciones portátiles y de bajo consumo energético. Su estructura de tres pines (alimentación, tierra y salida) facilita su integración, permitiendo una lectura directa con un convertidor analógico a digital (ADC) en sistemas de adquisición de datos o microcontroladores [41].

2.6.8 Aplicaciones del LM35

El LM35 se utiliza en una variedad de aplicaciones para medir y controlar la temperatura, incluyendo:

El sensor de temperatura LM35 es ampliamente utilizado en diferentes áreas por su precisión, simplicidad y facilidad de integración. En estaciones meteorológicas y sistemas de monitoreo ambiental, el LM35 proporciona datos precisos sobre la temperatura del aire, contribuyendo a un mejor análisis y predicción de condiciones meteorológicas [42]. En el ámbito industrial, cumple una función clave en el control de procesos que dependen de una temperatura específica, como en hornos, sistemas de refrigeración y procesos químicos, asegurando la eficiencia y seguridad de las operaciones [43]. En electrodomésticos como termostatos y sistemas de climatización, permite la regulación precisa de la temperatura, garantizando condiciones óptimas de confort y eficiencia energética en el hogar [44]. Además, gracias a su simplicidad y facilidad de uso, el LM35 es popular en entornos educativos y proyectos de hobby, donde se integra fácilmente con circuitos y sistemas de adquisición de datos, facilitando la enseñanza y el aprendizaje de conceptos básicos de electrónica y control de temperatura [45].

2.6.9 Consideraciones en el Uso del LM35

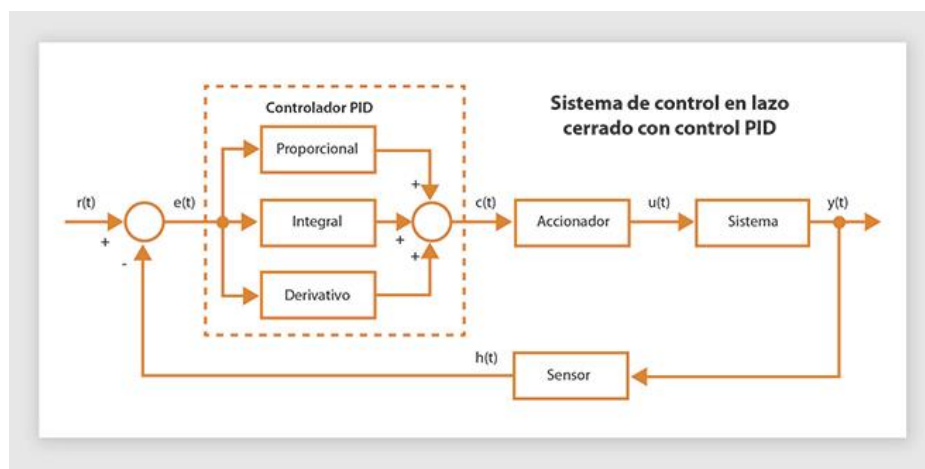
Para un rendimiento óptimo del sensor de temperatura LM35, es esencial tener en cuenta ciertos factores clave. El LM35 debe ser ubicado en un lugar que permita una medición precisa de la temperatura sin influencias externas que puedan alterar la lectura [42]. Además, el sensor requiere un suministro de voltaje estable, típicamente entre 4 V y 30 V. Es crucial comprobar de que la fuente de energía esté dentro del rango para garantizar un funcionamiento correcto y evitar posibles errores en las mediciones [44].

2.7 Controlador PID

Los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) son fundamentales en el control de temperatura debido a su simplicidad y eficacia. En una planta didáctica de control de procesos (EPC), el controlador PID mide la temperatura actual, la compara con el punto de consigna o temperatura deseada, y ajusta la fuente de calor o enfriamiento para regular la temperatura en el rango ideal [46].

El controlador PID opera ajustando continuamente la señal de control mediante sus tres acciones fundamentales: proporcional, integral y derivativa como se observa en la Figura 10. La acción proporcional refleja al error actual de temperatura, la acción integral corrige los errores acumulados a lo largo del tiempo, y la acción derivativa prevé cambios futuros en el error [47]. Esta combinación asegura que el sistema de temperatura se mantenga estable y preciso, a pesar de las perturbaciones o cambios en las condiciones internas y externas. La adecuada sintonización de estos parámetros es crucial para optimizar el rendimiento del sistema, garantizando la calidad y seguridad del proceso [48].

Figura 10 Diagrama de un controlador PID



Nota: Diagramas de bloques de un controlador PID [49].

2.7.1 Sintonización de Parámetros PID

La regulación de las variables PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es un proceso fundamental para mejorar el funcionamiento de un controlador PID. Los parámetros PID, que incluyen el coeficiente proporcional (K_p), el coeficiente integral (K_i) y el coeficiente derivativo (K_d), determinan cómo el controlador responde a los errores en el sistema. La correcta sintonización de estos parámetros asegura que el controlador pueda minimizar el error, mejorar la estabilidad del sistema y alcanzar un rendimiento óptimo [48],[50].

Existen varios métodos para la sintonización de estos parámetros. Uno de los métodos más tradicionales es el método de Ziegler-Nichols, que utiliza pruebas de oscilación para encontrar los valores óptimos de K_p , K_i y K_d . Este método es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y efectividad en sistemas lineales [51]. Otro enfoque es el ajuste manual, donde se ajustan los parámetros basándose en la experiencia y el análisis de la respuesta del sistema. Aunque este método puede ser eficaz, a menudo requiere ensayo y error y puede ser menos preciso que métodos más automatizados [48].

En la actualidad, técnicas más avanzadas como algoritmos genéticos y optimización por enjambre de partículas se emplean para la sintonización de parámetros PID. Estos métodos basados en inteligencia artificial buscan optimizar los parámetros del controlador mediante la simulación de procesos evolutivos o la emulación del comportamiento de enjambres naturales. La elección del método de sintonización está condicionada por la complejidad del sistema a controlar y de las especificaciones particulares de rendimiento, tales como rapidez en la respuesta, estabilidad, y precisión en el seguimiento [51],[52].

2.7.2 Aplicaciones del Control PID

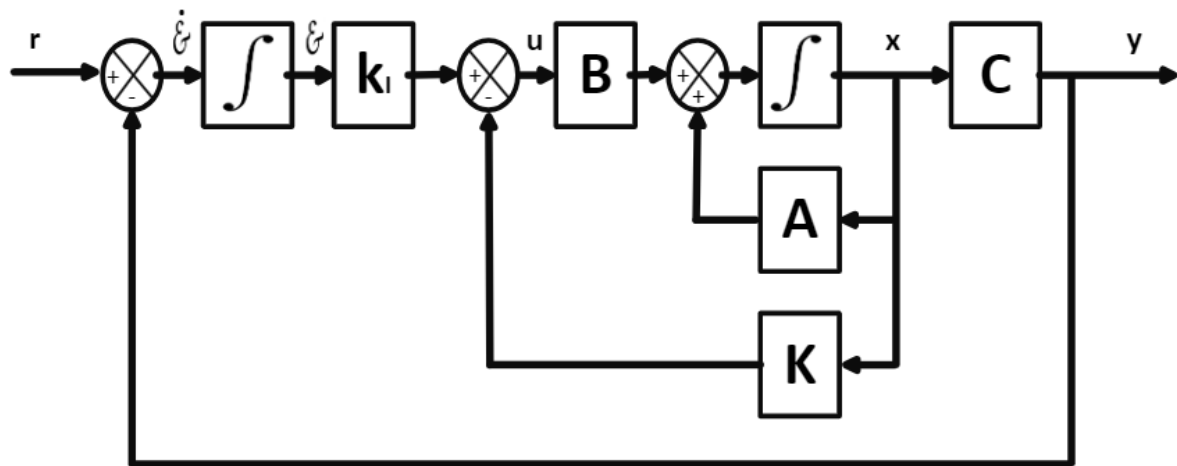
El controlador PID destaca por su eficacia en el control de temperatura, regulando con precisión sistemas de calefacción y refrigeración para mantener la temperatura deseada en una amplia gama de aplicaciones. Este ajuste continuo es crucial para garantizar que los sistemas operen dentro de los rangos óptimos, lo que asegura la calidad del producto y la eficiencia del proceso. Además del control de temperatura, el PID es ampliamente utilizado en el control de velocidad de motores eléctricos, donde mantiene una velocidad constante a pesar de las variaciones en la carga o las condiciones operativas, garantizando un funcionamiento estable y eficiente [48].

El PID también juega un papel importante en el control de presión en sistemas hidráulicos y neumáticos, ajustando las válvulas para conservar la presión en un rango específico y asegurando la operación segura y eficiente de equipos industriales. Asimismo, en el control de nivel en tanques de almacenamiento, el PID regula la entrada y salida de fluidos para mantener el nivel del líquido en un valor predeterminado. Su flexibilidad y robustez permiten su aplicación en sistemas lineales y no lineales, adaptándose a diversas condiciones operativas [47].

2.8 Controlador en Espacio de Estados

El control mediante el Espacio de Estados brinda un enfoque matemático sólido para diseñar y analizar sistemas de control, facilitando una demostración concisa y eficaz de la dinámica del sistema como se aprecia en la Figura 11. Este análisis es factible para el desarrollo de controladores capaces de cumplir objetivos específicos en sistemas complejos [53].

Figura 11 Diagrama de un controlador por Espacio de Estados



Nota: Diagramas de bloques de un controlador por Espacio de Estados.[54].

2.8.1 Fundamentos del Espacio de Estados

El modelo de espacio de estados se fundamenta en el despliegue de un sistema dinámico mediante un grupo de ecuaciones diferenciales lineales que explican el cambio en las variables de estado del sistema[55]. Esta representación permite una descripción completa y detallada de la dinámica del sistema en términos de su estado interno y las entradas que afectan dicho estado. A diferencia de los modelos tradicionales de entrada-salida que pueden no capturar todos los aspectos internos de un sistema, el enfoque del espacio de estados proporciona una visión más integral [56]. Este modelo se compone de un vector de estado, que incluye todas las variables necesarias para caracterizar integralmente el comportamiento del sistema en cualquier punto temporal, y un conjunto de ecuaciones que gobiernan cómo estas variables cambian con el tiempo. De esta manera, se facilita el análisis y diseño de sistemas complejos, permitiendo el estudio detallado de su desenvolvimiento dinámico y la aplicación de técnicas avanzadas de control [57].

2.8.2 Representación de Sistemas en Espacio de Estados

La representación en espacio de estados de un sistema utiliza dos conjuntos de ecuaciones fundamentales: las ecuaciones de estado y las ecuaciones de salida. Las ecuaciones de estado describen la evolución temporal del vector de estado, capturando la dinámica interna del sistema. Estas ecuaciones son típicamente de la forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

Donde $x(t)$ es el vector de estado, $u(t)$ es el vector de entrada, A es la matriz de estado que define las interacciones entre las variables de estado, y B es la matriz de entrada que define cómo las entradas afectan al sistema [56]. Por otro lado, las ecuaciones de salida relacionan el vector de estado con las variables de salida del sistema y son generalmente de la forma

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

donde $y(t)$ es el vector de salida, C es la matriz de salida, y D es la matriz de transmisión directa. Esta estructura permite la inclusión de múltiples entradas y salidas, proporcionando una visión integral y detallada del sistema. Además, facilita el diseño de controladores y observadores que pueden manejar sistemas multivariables y complejos [58].

2.8.3 Aplicaciones del Controlador por Espacio de Estados

Los controladores por espacio de estados son aplicados en una variedad de campos, incluyendo la robótica, sistemas de navegación, y procesos industriales. Su capacidad para manejar sistemas multivariables y su flexibilidad en el diseño los hacen adecuados para aplicaciones complejas donde se requiere un control preciso y robusto [59].

La implementación y simulación de controladores diseñados en el espacio de estados pueden realizarse utilizando herramientas de software como MATLAB y Simulink. Estas herramientas proporcionan entornos de modelado y simulación que permiten la verificación y ajuste del controlador en condiciones simuladas antes de su implementación real [60].

2.9 Métricas Claves en el Análisis de la Respuesta Temporal

En el análisis de la respuesta temporal de un sistema de control, se utilizan diversas métricas clave para evaluar su desempeño y eficiencia. Dos de las métricas más importantes son el tiempo de estabilización y el overshoot. Estas métricas proporcionan información crítica sobre cómo el sistema responde a cambios en la entrada o a perturbaciones, y son esenciales para el diseño y ajuste de controladores en el espacio de estados [61].

2.9.1 Tiempo de Estabilización

El tiempo de estabilización es el periodo necesario para que la respuesta de un sistema permanezca dentro de un rango específico alrededor del valor final deseado. Este rango se define comúnmente como un pequeño porcentaje, como el 4%, del valor final. El tiempo de estabilización es crucial para determinar la rapidez con la que un sistema puede alcanzar y mantener su estado estacionario deseado tras una perturbación o un cambio en la entrada de referencia [62].

La importancia del tiempo de estabilización radica en su capacidad para indicar la rapidez del sistema. Un tiempo de estabilización corto muestra que el sistema puede realizar cambios en las circunstancias operativas o a perturbaciones, lo cual es crucial en aplicaciones donde la velocidad de respuesta es crítica, como en sistemas de control de vuelo o en robótica [55]. Además, evaluar el tiempo de estabilización ayuda a entender la estabilidad del sistema. Un sistema que tarda demasiado en estabilizarse puede ser indicativo de problemas subyacentes en el diseño del controlador o en la configuración del sistema. Medir el tiempo de estabilización permite comparar diferentes configuraciones de controladores y optimizar los parámetros del sistema para lograr un rendimiento óptimo [62].

2.9.2 Overshoot

El overshoot se describe como la discrepancia entre el valor máximo obtenido por la variable controlada y su valor de referencia. Este fenómeno ocurre debido a la inercia del sistema y puede causar inestabilidad o daños en procesos sensibles. En control de temperatura, un alto overshoot puede llevar a fluctuaciones térmicas que afectan la calidad del producto o la eficiencia del proceso [61].

En el contexto del control de temperatura de una planta EPC, un alto overshoot puede resultar en variaciones de temperatura que afecten la integridad del proceso. Es crucial diseñar controladores que minimicen el overshoot para mantener la estabilidad térmica y asegurar la calidad del producto [62].

3. MARCO METODOLÓGICO

Este proyecto se desarrolla bajo un enfoque inductivo y experimental, aplicando conocimientos adquiridos en asignaturas clave como Teoría de Control I y II, Automatización Industrial I e Instrumentación Industrial. El objetivo principal es diseñar y poner en práctica un controlador en el Espacio de Estados para controlar la corriente requerida por un LED, con el fin de controlar de manera precisa la temperatura en nuestra planta.

Paso 1: El proceso comenzó con la identificación del sistema, utilizando la herramienta System Identification Toolbox proporcionada por MATLAB. Esta herramienta nos permitió modelar el comportamiento dinámico del sistema a partir de datos experimentales, estableciendo una base sólida para el diseño del controlador. Posteriormente, se implementó un interfaz gráfico en LabVIEW para facilitar la interacción y el control del sistema en tiempo real.

Paso 2: Con el modelo identificado, se diseñó el controlador en el Espacio de Estados. Este controlador se basa en una representación matemática avanzada que permite gestionar de manera eficiente la dinámica del sistema, ajustando los parámetros de control para mantener la temperatura deseada en la planta.

Paso 3: Una vez diseñado el controlador, se llevaron a cabo pruebas para validar su efectividad. Estas pruebas incluyeron la simulación de diferentes escenarios operativos para asegurar que el controlador respondiera adecuadamente a la variación de Temperatura

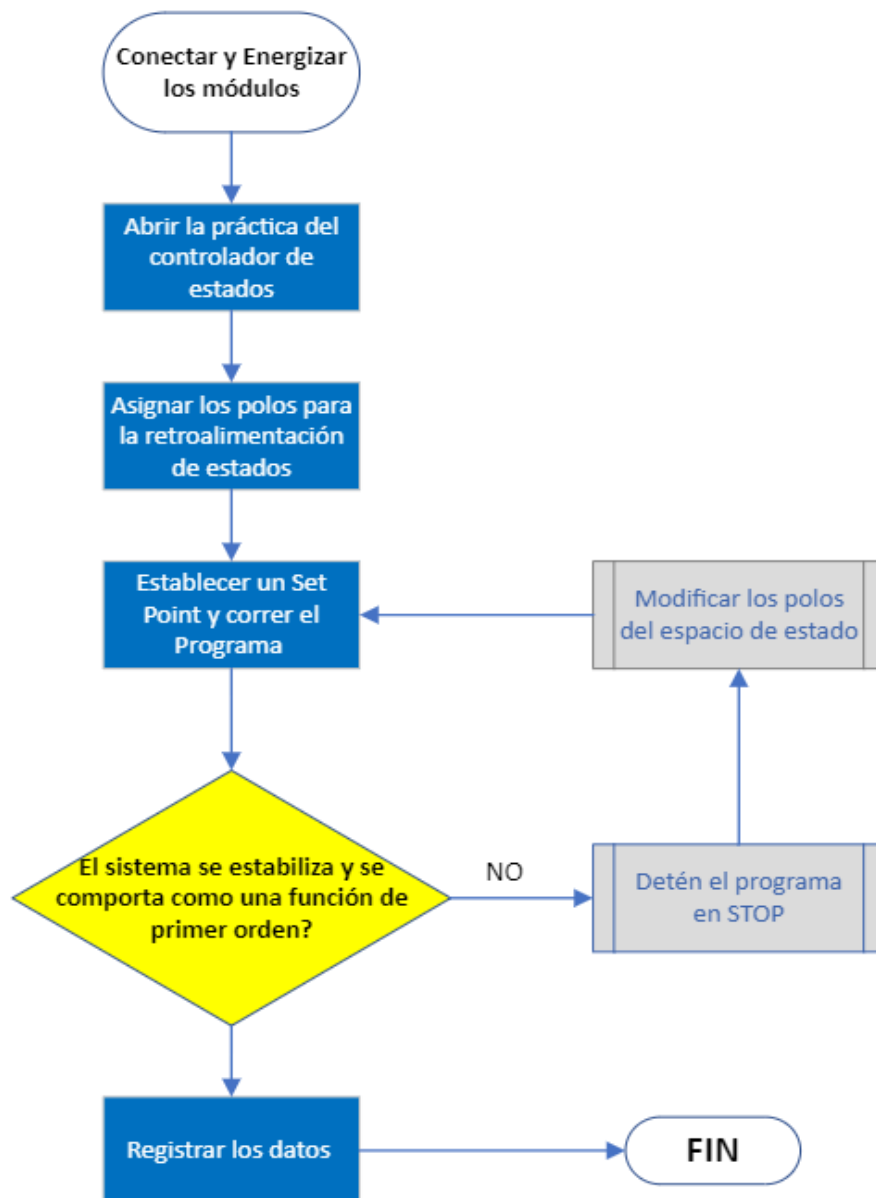
Paso 4: Se realizó una comparativa detallada entre el controlador PID y el controlador en el Espacio de Estados. Esta comparación nos permitió evaluar las ventajas y desventajas de cada enfoque en términos de precisión, estabilidad y capacidad de respuesta.

Paso 5: Finalmente, se llevaron a cabo tres prácticas clave: la implementación del controlador en el Espacio de Estados, la aplicación del controlador PID, y una evaluación comparativa entre ambos controladores. Estas prácticas proporcionaron una visión integral del rendimiento de cada controlador, destacando la eficacia del controlador en el Espacio de Estados en comparación con el PID en diferentes condiciones operativas.

3.1 Metodología para el diseño del controlador en Espacio de Estados

En esta fase del desarrollo, se implementan ajustes en el panel frontal del Controlador en el Espacio de Estados utilizando LabVIEW. Estas modificaciones están orientadas a la optimización de la interfaz gráfica de usuario, con el fin de mejorar la organización de los comandos y la parte visual. La intención es adaptar la interfaz a los requerimientos específicos del sistema, promoviendo una mejora en la visualización y el control del proceso. El objetivo de estos ajustes es simplificar la recolección y el análisis de datos del controlador, facilitando así la gestión, como se ejemplifica en la Figura 12.

Figura 12 Diagrama de Flujo para la validación del Controlador en Espacio de Estados

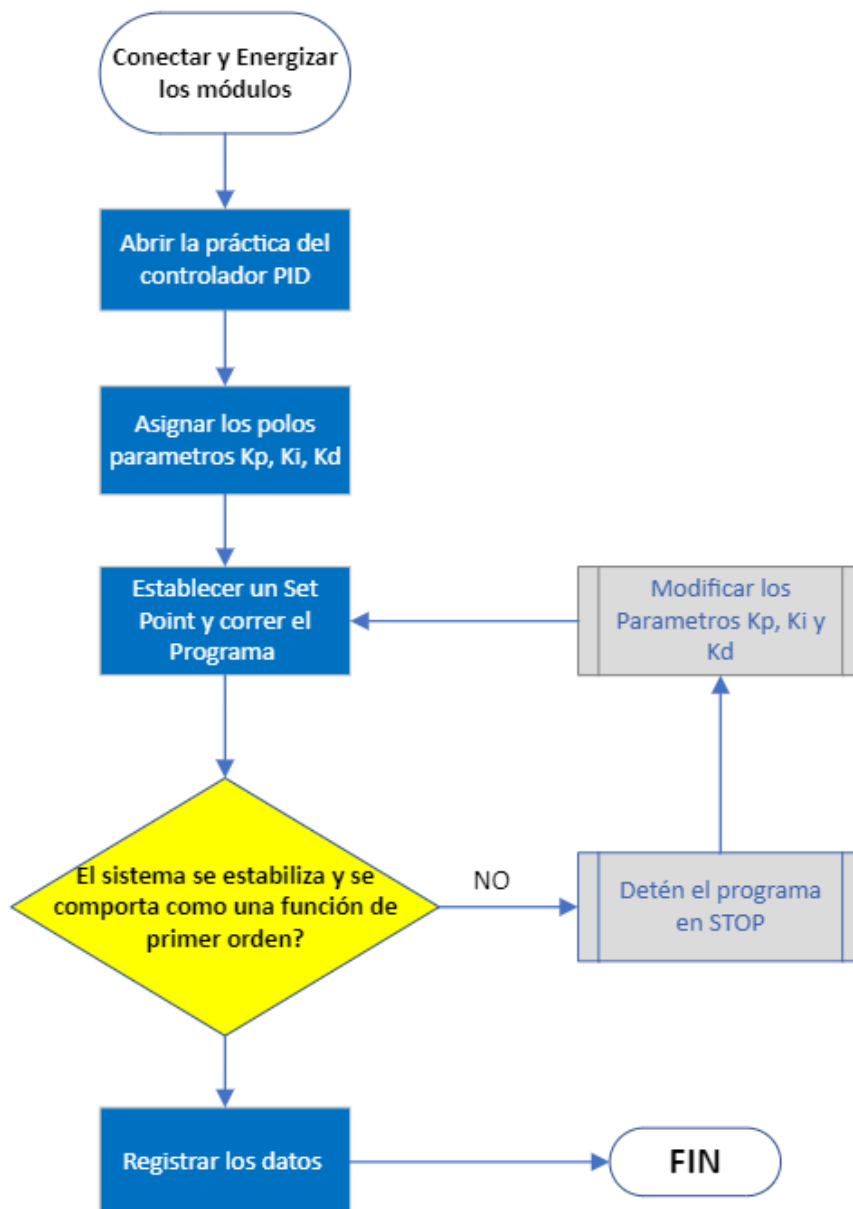


Nota: Diagrama de flujo realizado por autores

3.2 Metodología para el diseño del controlador PID

En esta etapa del desarrollo, se realizan ajustes en el panel frontal del Controlador PID en LabVIEW. Estos cambios están dirigidos a optimizar la interfaz gráfica de usuario, mejorando la organización de los comandos y su forma visual. El objetivo es adaptar la interfaz a los requisitos particulares del sistema, con el fin de ofrecer una experiencia visual más clara para la supervisión y el control. Las modificaciones buscan facilitar la recolección y el análisis de datos del controlador, haciendo el proceso más eficiente, como se ilustra en la Figura 13.

Figura 13 Diagrama de Flujo para la validación del Controlador PID



Nota: Diagrama de realizado por autores

3.3 Pruebas y análisis comparativo de la eficacia de dos Controladores

En esta etapa del proyecto, se llevan a cabo análisis experimentales con el propósito de recabar información sobre los resultados del sistema utilizando tanto el Controlador en el Espacio de Estados como el Controlador PID. Estas pruebas son fundamentales para evaluar y comparar el rendimiento de ambos controladores en situaciones reales.

Durante las pruebas, se implementó ambos controladores por separado para observar las salidas del sistema bajo diversas condiciones de operación. Para cada controlador, se monitoreo variables críticas como la estabilidad, el tiempo de respuesta, el sobre impulso y la precisión en el seguimiento de la referencia establecida. Se realizan múltiples iteraciones para asegurar que los datos recopilados sean representativos y consistentes.

Además, se analiza cómo cada controlador maneja perturbaciones y cambios en la carga, proporcionando una visión completa de su robustez y adaptabilidad. Los datos obtenidos de estas pruebas serán detalladamente registrados y analizados, utilizando herramientas estadísticas y de visualización para identificar patrones y diferencias significativas entre los dos enfoques.

Al finalizar esta fase experimental, se llevó a cabo una comparación exhaustiva de los resultados obtenidos con cada controlador. Se evaluaron parámetros clave como la eficiencia energética, la facilidad de implementación. Esta comparación permitirá extraer conclusiones sobre la eficiencia y el rendimiento relativo de ambos controladores en el sistema en estudio.

Finalmente, las conclusiones derivadas de esta comparación permiten determinar cuál de los dos enfoques el Controlador en el Espacio de Estados o el Controlador PID, proporciona un mejor rendimiento global en términos de estabilidad, respuesta y robustez del sistema. Esta información aportará a las bases para futuros desarrollos y optimizaciones del sistema de control.

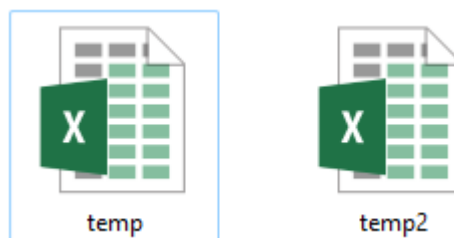
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Identificación del modelo de la Planta EPC

Para identificar el modelo de la Planta EPC, se realizaron diversas prácticas experimentales centradas en el control manual de la temperatura. Se llevaron a cabo pruebas de control en lazo abierto, donde la planta operaba sin retroalimentación. Estas pruebas permitieron observar su comportamiento natural ante diferentes niveles de entrada, proporcionando datos cruciales sobre la respuesta del sistema y formando la base para el modelado inicial de la planta.

Se identificó la Temperatura como variable principal del sistema, se capturó los datos mediante la herramienta LabVIEW generando así una base de datos como se observa en la Figura 14 la cual nos ayudara a realizar el modelado de nuestro sistema o comúnmente conocida como función de transferencia del sistema. Este proceso se apoyó en el System Identification Toolbox de MATLAB, el cual permitió obtener modelos matemáticos que describen la dinámica del sistema. A través de pruebas experimentales, se evaluaron y validaron diferentes modelos de función de transferencia para determinar cuál de ellos mejor se ajusta a las características específicas de nuestra planta EPC.

Figura 14 Data Base EPC



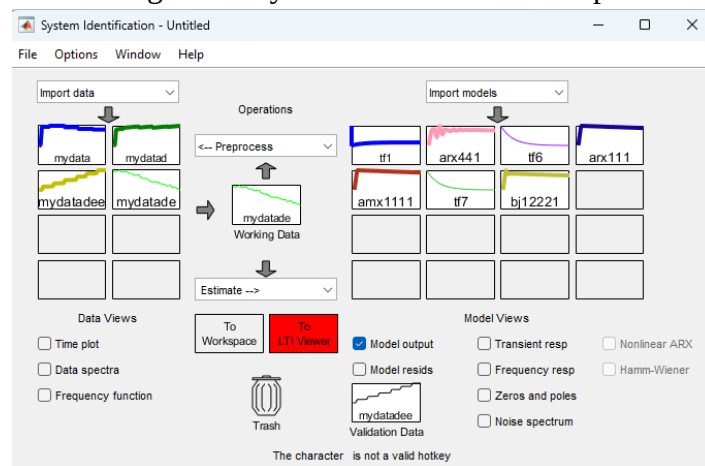
Nota: Datos recopilados de la planta EPC

Utilizando los datos recopilados de las pruebas en lazo abierto, se aplicaron técnicas de identificación de sistemas para desarrollar un modelo matemático. Este modelo se obtuvo mediante herramientas como el System Identification Toolbox de MATLAB, que permitió capturar las características dinámicas del sistema sin la influencia de la retroalimentación, analizando los modelos obtenidos de las bases de datos.

4.1.1 Primera Identificación y Análisis de Modelos de Temperatura

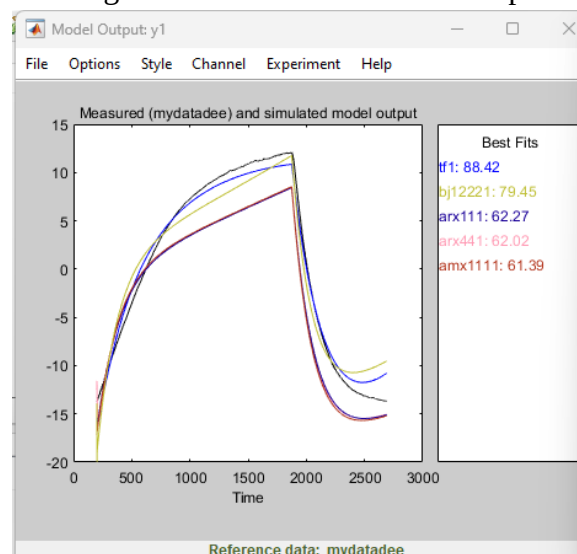
En el análisis de la base de datos de temperatura (Temp), se evaluaron distintos modelos de identificación como se observa en la Figura 15. El modelo de función de transferencia de primer orden (tf1) proporcionó el mejor ajuste, con un 88.42% de coincidencia, destacándose por su simplicidad y efectividad para estimaciones rápidas. El modelo de Box-Jenkins (bj12221) tuvo un ajuste del 79.45%, siendo útil para capturar la estructura del ruido en los datos y proporcionando un análisis más detallado. Por último, el modelo autoregresivo con entrada exógena (arx111) mostró un ajuste del 62.27%, siendo una opción sencilla y rápida de implementar a pesar de su menor precisión como muestra en la Figura 16.

Figura 15 System Identification Temp



Nota: Se evaluaron diferentes modelos de identificación

Figura 16 Best Fit Data base Temp



Nota: Se determinó que el mejor análisis es Box-Jenkins

4.1.2 Segunda Identificación y Análisis de Modelos de Temperatura

En el análisis de la base de datos de temperatura Temp1, se identificaron varios modelos como se observa en la Figura 17. Aunque el modelo de Box-Jenkins (bj22221) presentó el mejor ajuste con un 93.14% de coincidencia, y el modelo de función de transferencia de segundo orden (tf2) logró un ajuste del 87.25%, el enfoque se centra en la necesidad de un modelo de primer orden para el sistema.

El modelo de función de transferencia de primer orden (tf5) mostró un ajuste del 75.95%. A pesar de su menor precisión comparado con los otros modelos más complejos como se observa en la Figura 18, su simplicidad y facilidad de implementación lo hacen adecuado para el sistema en cuestión, especialmente en aplicaciones donde se requiere una rápida y sencilla representación de la dinámica del sistema.

Figura 17 System Identification Temp1

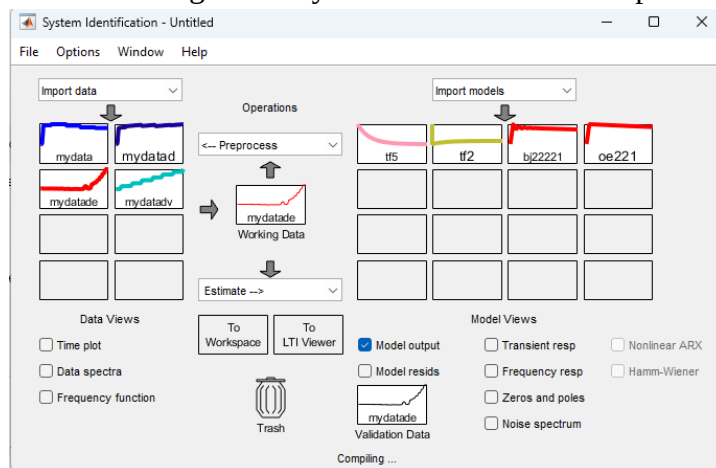
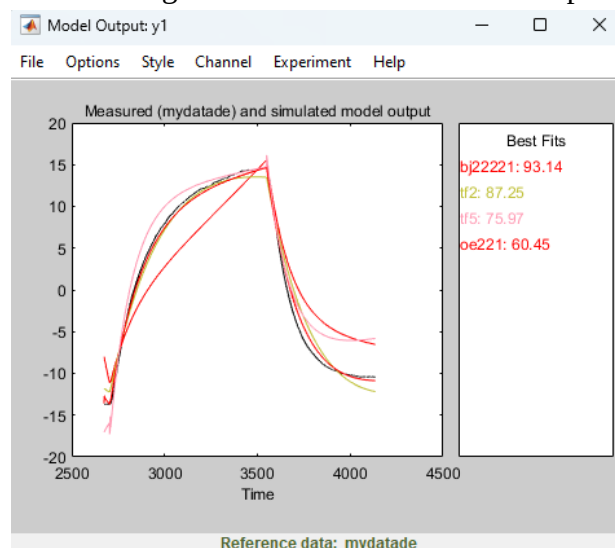


Figura 18 Best Fit Data base Temp1



4.1.2 Selección del modelo para nuestro controlador

En el proceso de identificación de modelos para los sistemas de temperatura (Temp y Temp1), se evaluaron varias configuraciones para determinar cuál ofrecía el mejor ajuste con los datos observados. Los modelos analizados incluyen funciones de transferencia de primer y segundo orden, así como modelos de Box-Jenkins y autoregresivos con entrada exógena. La siguiente tabla 1 resume los porcentajes de coincidencia y los órdenes de los mejores ajustes obtenidos para cada base de datos:

Tabla 1 Resultados de los Modelos Identificados

Data Base	Modelo	Best Fit	Orden
Temp	tf1	88.42 %	1er
Temp	bj12221	79.45 %	2do
Temp	arx111	62.27 %	1er
Temp1	bj22221	93.14 %	2do
Temp1	Tf2	87.25 %	2do
Temp1	Tf5	75.95 %	1er

Entre los modelos evaluados para la base de datos Temp, el modelo de función de transferencia de primer orden (tf1) se destacó con un ajuste del 88.42%, siendo el mejor resultado obtenido. Este modelo no solo ofrece la mejor coincidencia con los datos, sino que también se ajusta a la necesidad de utilizar una función de primer orden para simplificar la implementación y el análisis del sistema. Aunque otros modelos, como el de Box-Jenkins (bj12221) y el autoregresivo con entrada exógena (arx111), presentaron buenos ajustes, el modelo tf1 proporciona un equilibrio óptimo entre precisión y simplicidad, lo que lo hace la opción más adecuada para nuestros objetivos.

A continuación, se muestra la función de transferencia que modela nuestra Planta EPC obtenida con el Software matemático Matlab

$$G = \frac{0.0008394s + 0.0023}{s + 0.0001639}. \quad (1)$$

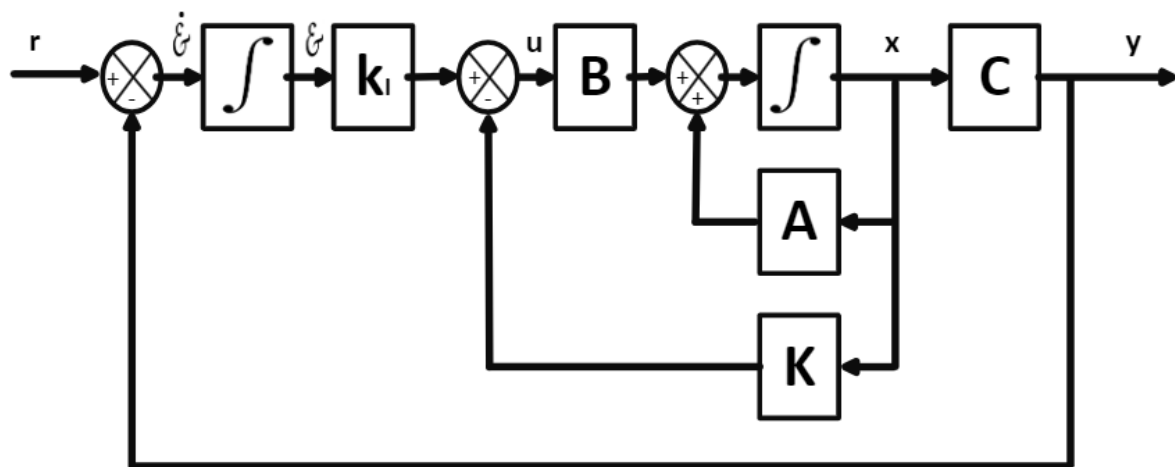
Donde u es la entrada e y es la salida.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.0008394s + 0.0023}{s + 0.0001639}$$

4.2 Diseño del Controlador en el Espacio de Estados:

En esta fase del proyecto, se llevó a cabo el diseño detallado del controlador en el Espacio de Estados utilizando LabVIEW. Este proceso implica la traducción de las ecuaciones de espacio de estados obtenidas previamente en un modelo matemático funcional y aplicable al sistema de control de la Planta Didáctica (EPC). Debemos tener definidas las matrices A, B, C y D, así como una realimentación dada por el sensor de temperatura LM35 y una realimentación de Estados como se muestra en la figura 19.

Figura 19 Diagrama de control en espacio de estados



Nota: Diagramas de bloques de un controlador por Espacio de Estados [49].

Se utilizarán bloques y conexiones gráficas en LabVIEW para implementar las ecuaciones de espacio de estados desarrolladas durante la identificación del sistema. Estas ecuaciones representan la dinámica del sistema y serán fundamentales para el diseño del controlador.

4.2.1 Asignación de polos

Para llevar a cabo la ubicación de polos en un sistema de control, es esencial primero representar el sistema en la forma de Espacio de Estados. Esta representación permite describir el sistema mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales. Posteriormente, se deben determinar las ubicaciones requeridas de los polos en el plano complejo, que se seleccionan en función de los criterios de desempeño y estabilidad requeridos para el sistema [63].

Una vez establecidas las posiciones específicas de los polos, se procede a diseñar un Controlador de Retroalimentación de Estados, también conocido como controlador de estado,

con el objetivo de calcular las matrices de ganancia del Controlador, denotadas por K . Este controlador se encarga de modificar las características dinámicas del sistema de tal manera que los polos del sistema en lazo cerrado coincidan con las posiciones previamente seleccionadas. Este proceso de retroalimentación de Estados es crucial ya que permite ajustar la respuesta del sistema, mejorando su estabilidad y desempeño según las especificaciones deseadas [56].

Además, es importante considerar que la elección adecuada de los polos puede influir en varios aspectos del comportamiento del sistema, tales como la velocidad de respuesta, el sobreimpulso y la amortiguación. Por lo tanto, se debe realizar un análisis cuidadoso y detallado para garantizar que las posiciones de los polos seleccionadas cumplan con todos los criterios necesarios para el rendimiento óptimo del sistema de control [54].

4.2.2 Principio del Modelo Interno

Durante la implementación de este sistema, se observaron dificultades significativas para seguir la referencia deseada de manera eficiente, lo que llevó a la introducción del Principio del Modelo Interno. Este principio establece que, para rechazar con precisión una perturbación, es fundamental que el controlador incorpore una representación de la perturbación [54].

Así, se implementó un integrador en el controlador, que opera como un esquema de una perturbación constante, mejorando la capacidad del sistema para manejar y rechazar estas perturbaciones. Este integrador, al acumular el error de señal, permite que el controlador ajuste continuamente su salida para contrarrestar la influencia de la perturbación, logrando así una respuesta más robusta y estable [64].

Además, se utiliza la técnica de modelado del sistema en el Espacio de Estados, lo que proporciona una representación más completa y detallada del sistema. Este enfoque permite analizar las interacciones entre las variables de estado, mejorando la comprensión y el diseño del controlador. El uso de esta técnica facilita la identificación de los estados del sistema y la implementación de estrategias de control más efectivas, como la colocación de polos utilizando la técnica de Ackermann, que asegura la estabilidad del sistema mediante la adecuada ubicación de los polos en el plano complejo [65].

4.2.3 Determinación de la matriz K utilizando la fórmula de Ackermann.

La fórmula de Ackermann es una herramienta que se utiliza para calcular la matriz de ganancias (K) de manera que los polos deseados del sistema en lazo cerrado coincidan con ciertos valores predeterminados [66].

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \quad (2)$$

La fórmula de Ackermann se utiliza para sistemas en los que todos los estados son completamente controlables, lo que significa que es posible regular cada uno de ellos mediante la retroalimentación de estados. La expresión matemática de esta fórmula es la siguiente:

$$K = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1] [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B]^{-1} * \phi(A) \quad (3)$$

El sistema inicial se representa en el Espacio de Estados usando las ecuaciones que se detallan a continuación:

$$x = y \quad (4)$$

$$\dot{x} = \dot{y} \quad (5)$$

$$y = -0.16 * 1 * y$$

$$\dot{x} = (-0.16) x + (1) u \quad (6)$$

$$y = (0.23) x + [0]u(t) \quad (7)$$

Al añadir un integrador, el sistema debe ajustarse de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.16 & 0 \\ -0.23 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (8)$$

$$y(t) = [0.23 \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + [0] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (9)$$

En el contexto de un servosistema, la retroalimentación de estados juega un papel crucial en la determinación de las ganancias necesarias para el controlador. Para lograr esto, se utiliza una fórmula específica que facilita el cálculo de estas ganancias. Esta fórmula permite ajustar los parámetros del controlador para optimizar el desempeño del sistema, asegurando que se cumplan las condiciones deseadas de control y estabilidad [63]. A continuación, se presenta la fórmula empleada en este proceso, que es fundamental para la configuración precisa del controlador en el servosistema.

$$\left| \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.16 & 0 \\ -0.23 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [K1 \quad K2] \right| \quad (10)$$

La ecuación característica para el sistema es

$$s^2 + (K1 + 0.16)s - 0.23K2 \quad (11)$$

Polos arbitrarios

Siendo el polinomio característico del sistema ampliado en lazo cerrado, al tratarse de un sistema de segundo orden, se deben de definir dos polos arbitrariamente, siendo estos dando lugar a otro polinomio, $s^2 + 0.162s + 0.00023$.

Para concluir, se especifican las ganancias para la realimentación de los Estados.

$$K1 + 0.16 = 0.162$$

$$-0.23 * K2 = -0.00023$$

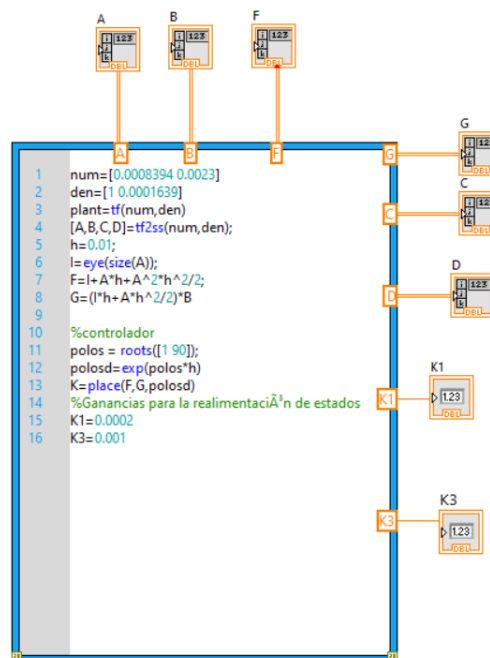
Por tanto, se obtiene que

$$\mathbf{K} = [\ 0.0002 \quad -0.001] \quad (12)$$

4.3 Implementación en LabVIEW

En LabVIEW, se introduce el sistema en el Espacio de Estados mediante el uso del bloque Math Script, que ofrece la capacidad de ingresar un script similar al de MATLAB. Dentro de este bloque, se detalla el modelo del sistema, especificando las ecuaciones y variables que lo definen. Posteriormente, este modelo continuo se somete a un proceso de discretización, permitiendo su análisis y control en el dominio digital. Este procedimiento se ilustra en la Figura 20, donde se observa cada etapa del proceso, desde la definición del modelo hasta su conversión en una forma adecuada para la implementación digital.

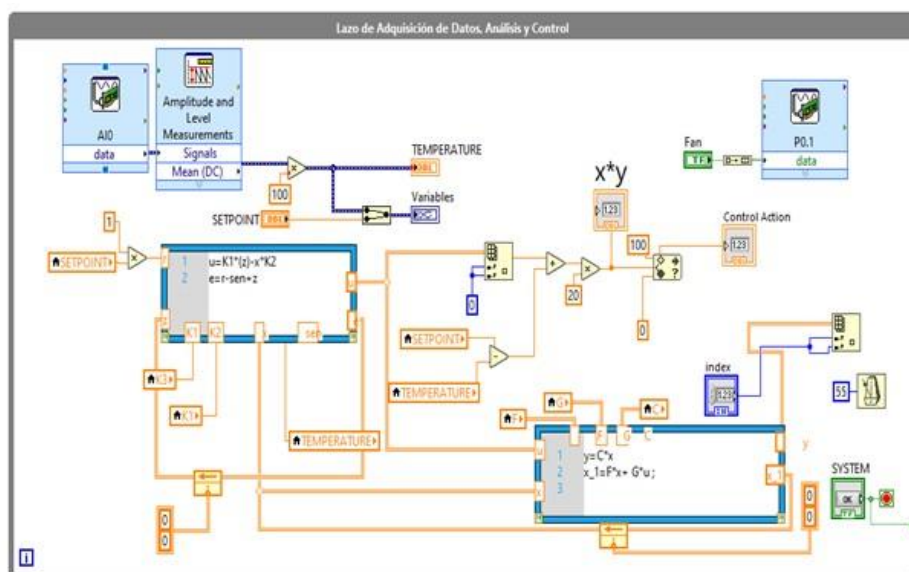
Figura 20 Bloque Math Scrip de LabVIEW



Nota: Análisis de las matrices A, B, C, D[49].

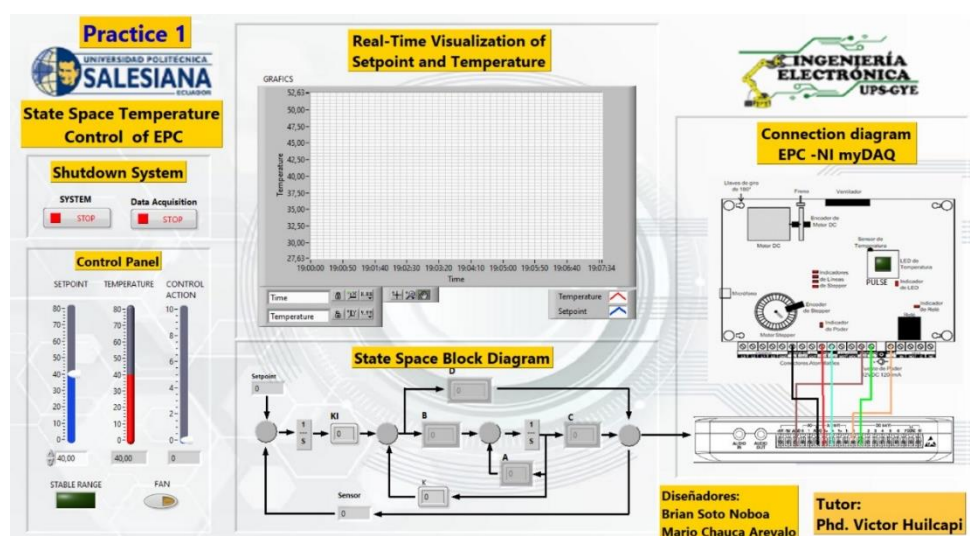
Dentro del bucle While Loop, se encuentran todos los componentes necesarios para establecer una comunicación efectiva entre la planta didáctica EPC y LabVIEW, tal como se ilustra en la Figura 21. Este bucle no solo facilita el intercambio de datos, sino que también incluye todos los elementos esenciales para llevar a cabo la acción de control y la implementación del Espacio de Estados. Se detalla cómo se manejan las variables de estado y las ecuaciones de control dentro del bucle, asegurando que el sistema opere de manera continua y precisa, manteniendo una interacción constante y eficiente con la planta EPC.

Figura 21 Acción de control y la implementación del Espacio de Estados



Finalmente, en la Figura 22 se presenta el diseño de la interfaz que proporciona una visión integral del sistema en operación. Esta interfaz está configurada para mostrar de manera clara y detallada varios aspectos cruciales del proceso. En primer lugar, se visualiza la respuesta del sistema a la referencia establecida, permitiendo una evaluación precisa de cómo el sistema ajusta su comportamiento en respuesta a las señales de entrada. Además, se incluye un diagrama de bloques del sistema, que ofrece una representación gráfica del flujo de información y el control dentro del sistema.

Figura 22 Interfaz Gráfica del Controlador

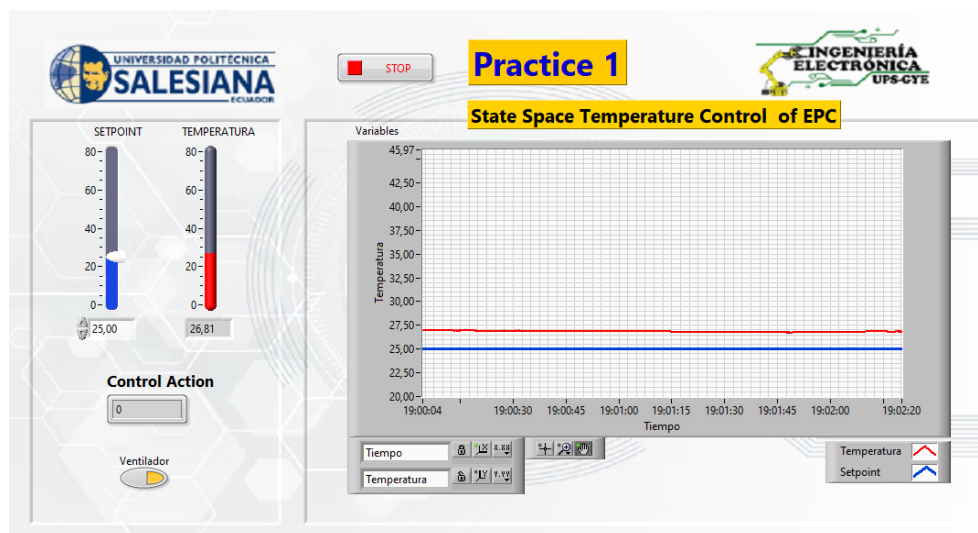


4.4 Análisis en del controlador en Espacio de estados

4.4.1 Escenario 1 Espacio Estados 1 Setpoint 25°C

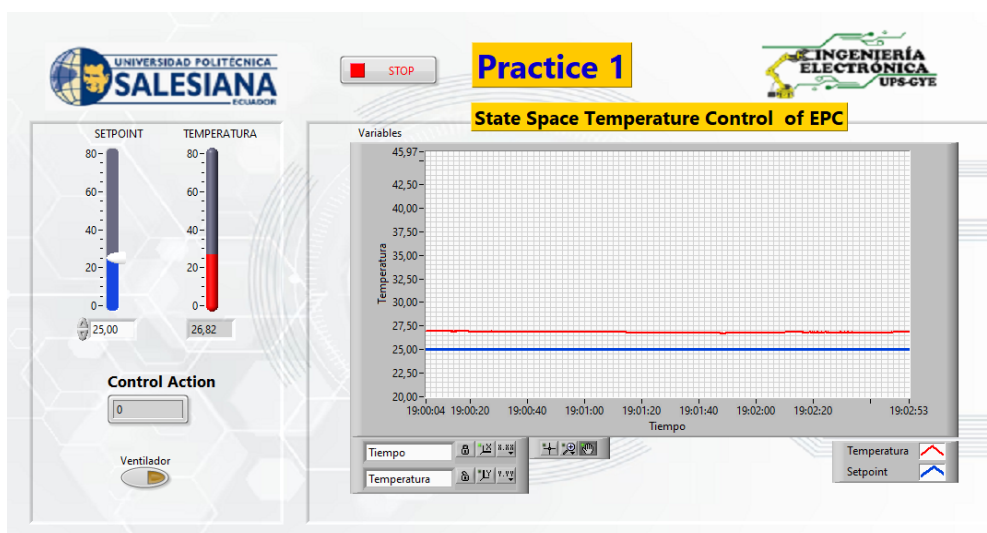
En el primer escenario, se estableció un setpoint de 25°C. Durante la prueba, se observó que nuestra Planta (EPC) no logro llegar al setpoint deseado, la temperatura no logro bajar de 26.81°C en condiciones ideales como se muestra en la figura 23 y que al inducirle una perturbación es decir apagando el ventilador la temperatura se mantuvo como se muestra en la figura 24, esto demuestra que nuestro controlador no puede ajustar eficazmente la temperatura a niveles más bajos debido a las limitaciones físicas ya que no posee un sistema de enfriamiento.

Figura 23 Análisis de temperatura en el Escenario 1 Espacio de Estados



Nota: En condiciones ideales sin perturbación la planta llega al límite de inferior de 26.81°C.

Figura 24 Análisis Temp. en Espacio de Estados 1 con Perturbación

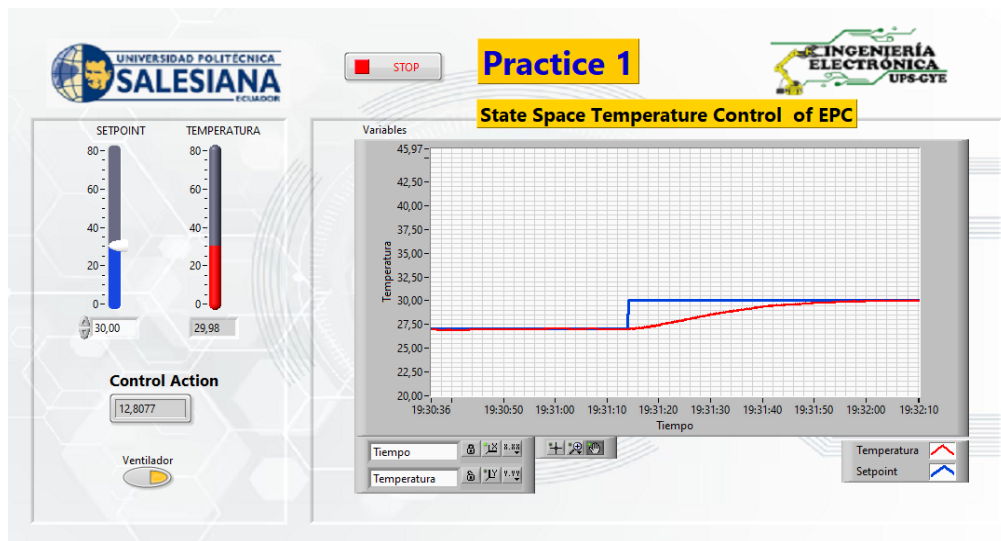


Nota: Se observa que induciéndole una perturbación la planta se mantiene.

4.4.2 Escenario 2 Espacio Estados Setpoint 30°C

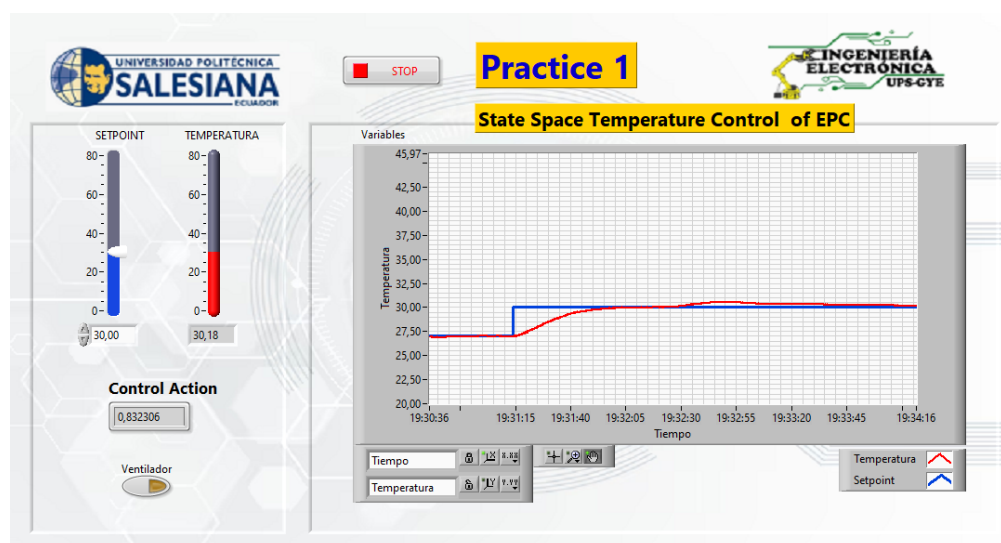
En el segundo escenario, el sistema comenzó con una temperatura inicial de 27°C y se estableció un setpoint de 30°C. Durante la prueba, se observó que el tiempo de estabilización fue de 0,7 min. No presenta sobre impulso como se muestra en la figura 25, pero al inducirle una perturbación este generó un overshoot de 1.5% llegando, pero manteniéndose en el rango aceptable de estabilización como se muestra en la figura 26, demostrando su capacidad para manejar ajustes significativos en las condiciones de operación.

Figura 25 Análisis de temperatura en el Escenario 2 Espacio de Estados



Nota: La planta se estabiliza en 0,7 min con condiciones ideales.

Figura 26 Análisis Temp. en Espacio de Estados 2 con Perturbación

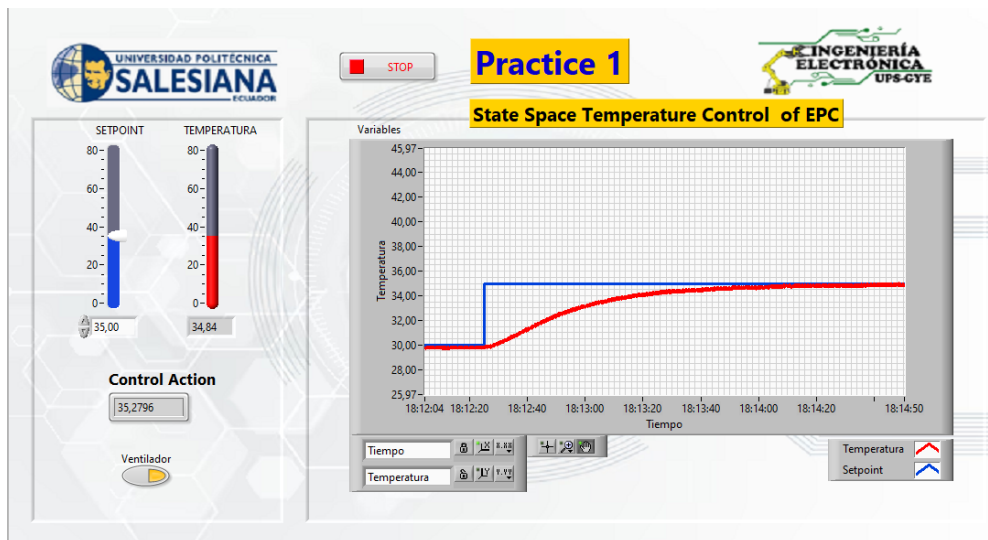


Nota: Se generó un overshoot de 1,5% debido a la perturbación, pero manteniéndose en el rango de 2% de estabilidad.

4.4.3 Escenario 3 Espacio Estados Setpoint 35°C

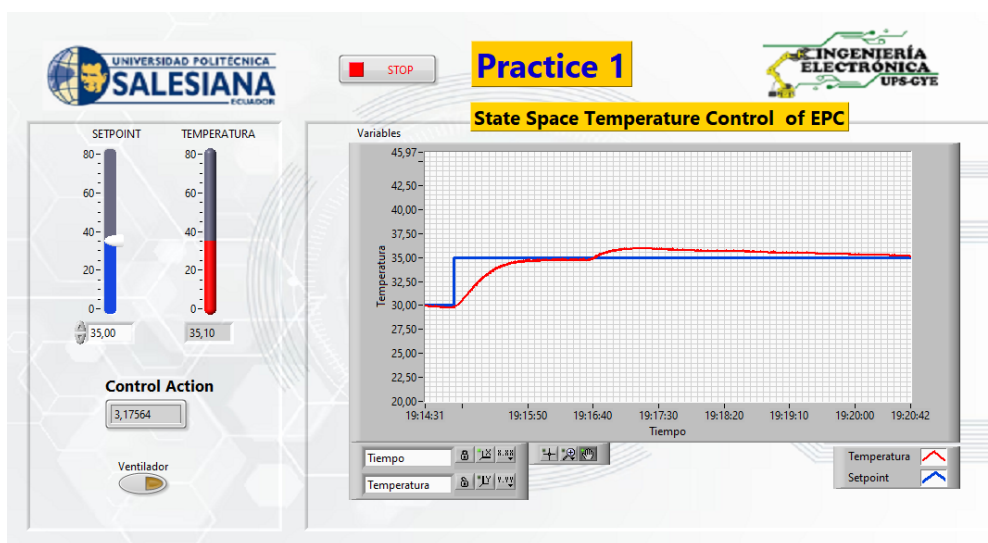
En el tercer escenario, la prueba comenzó con una temperatura inicial de 30°C y un setpoint de 35°C. El sistema mostró un tiempo de estabilización de 1 min como se muestra en la figura 27, el controlador logró estabilizar la temperatura en el setpoint deseado a pesar de someterse a una perturbación como se muestra en la figura 28, manteniéndose estable, demostrando su capacidad para manejar ajustes significativos en las condiciones de operación.

Figura 27 Análisis de temperatura en el Escenario 3 Espacio de Estados



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales.

Figura 28 Análisis Temp. en Espacio de Estados 3 con Perturbación

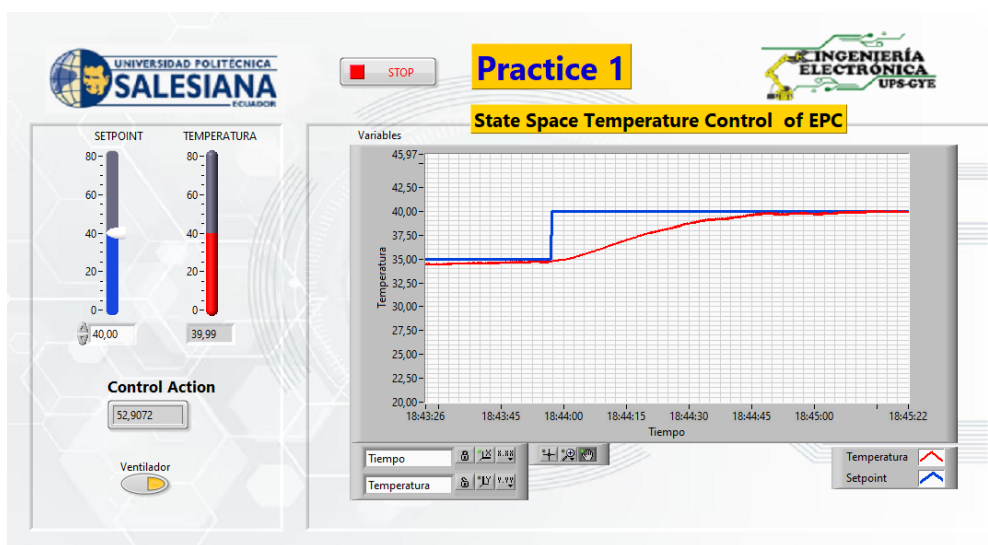


Nota: Se genero un overshoot de 2,57% debido a la perturbación y su tiempo de estabilización es de 4 min.

4.4.4 Escenario 4 Espacio Estados Setpoint 40°C

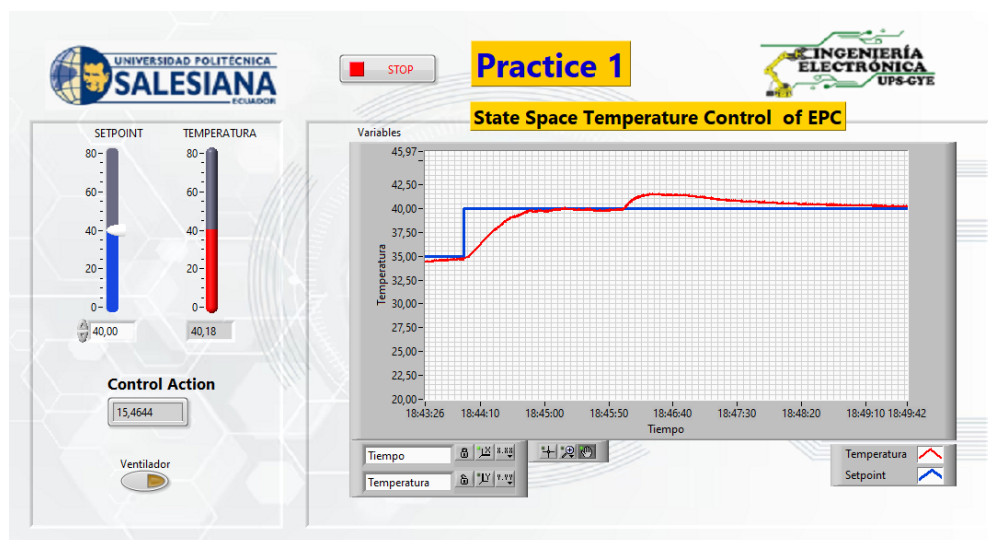
En el cuarto escenario, con una temperatura inicial de 35°C y un setpoint de 40°C, el tiempo de estabilización fue de 1min, no presenta overshoot en condiciones ideales como se muestra en la figura 29, pero al inducirle una perturbación este sobrepasa el rango de estabilidad con un overshoot de 6,25% pero controlando en un tiempo de 3min como se muestra en la figura 30, lo cual demuestra que en este punto de operación el control es menos preciso al existir perturbaciones.

Figura 29 Análisis de temperatura en el Escenario 4 Espacio de Estados



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales.

Figura 30 Análisis Temp. en Espacio de Estados 4 con Perturbación

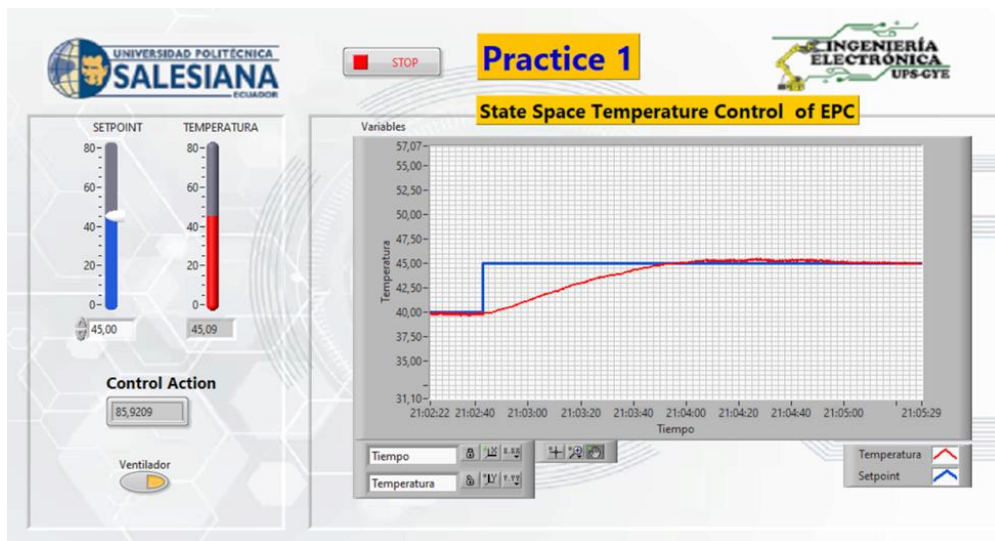


Nota: Se genero un overshoot de 6,25% debido a la perturbación y su tiempo de estabilización es de 3 min.

4.4.5 Escenario 5 Espacio Estados Setpoint 45°C

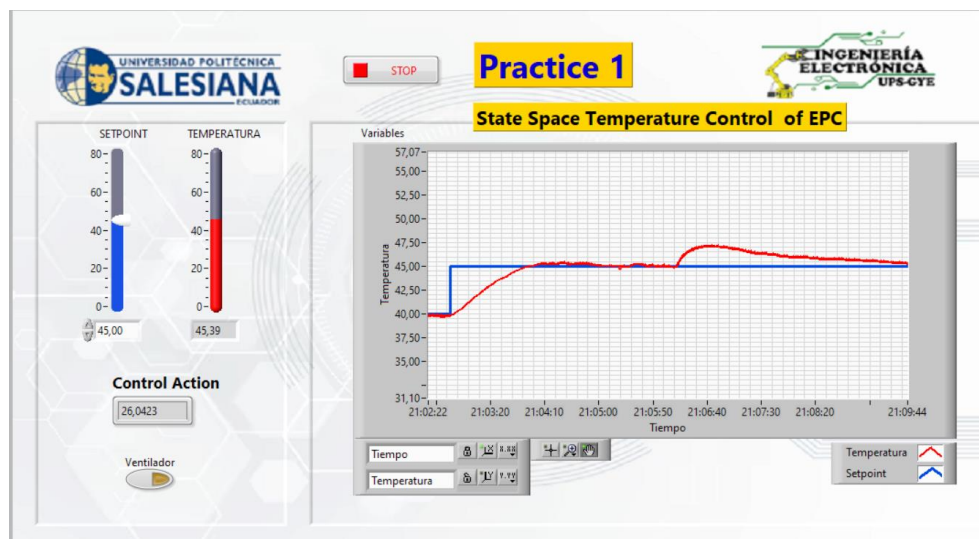
En el quinto escenario, con una temperatura inicial de 40°C y un setpoint de 45°C, el tiempo de estabilización fue de 1 min, presenta un overshoot razonable dentro del rango de estabilización el 1,78% como se muestra en la figura 31, pero al inducirle una perturbación este género un overshoot de 3,33% superando el rango de estabilidad por 2 min, en este punto vemos una ligera disminución el tiempo de estabilización al ocurrir una perturbación como se muestra en la figura 32.

Figura 31 Análisis de temperatura en el Escenario 5 Espacio de Estados



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales.

Figura 32 Análisis Temp. en Espacio de Estados 5 con Perturbación

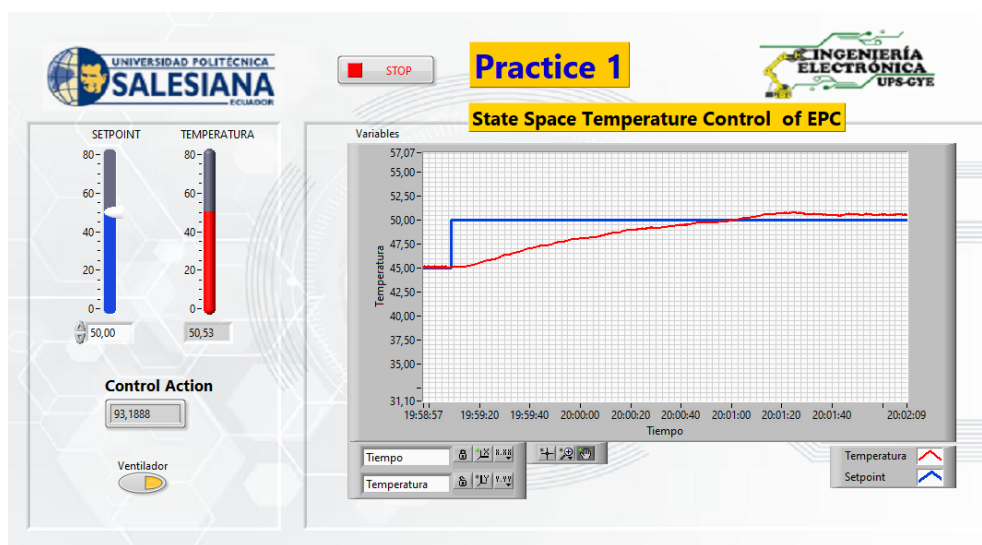


Nota: Se genero un overshoot de 3,33% debido a la perturbación y su tiempo de estabilización es de 2 min.

4.4.6 Escenario 6 Espacio Estados Setpoint 50°C

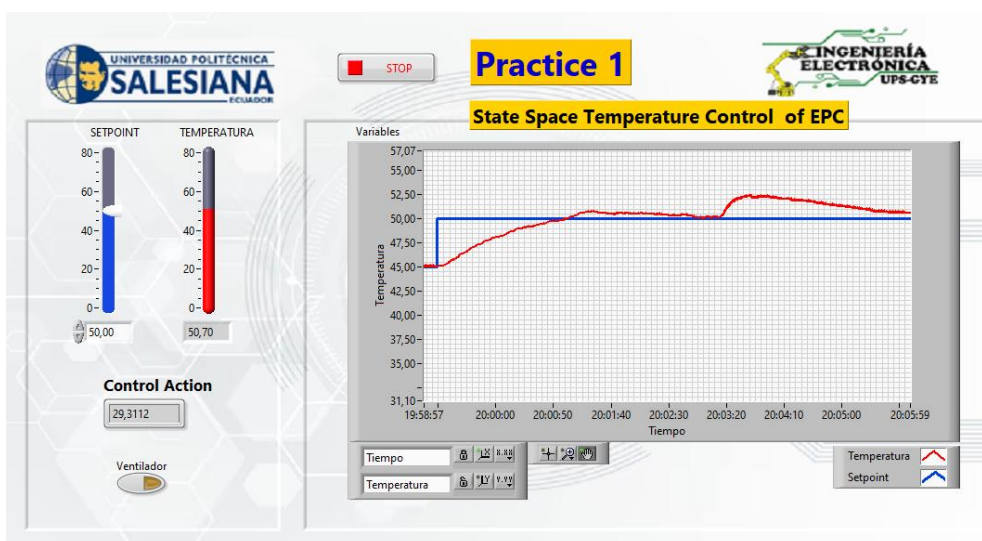
En el sexto escenario, con una temperatura inicial de 45°C y un setpoint de 50°C, El sistema mostró un tiempo de estabilización de 1 min, el controlador logró estabilizar la temperatura en el setpoint deseado como se muestra en la figura 33, al someterse a una perturbación este género un overshoot de 5%, lográndose estabilizar pasado los 3 min como se muestra en la figura 34, podemos determinar que el sistema en este punto de operación no responde bien a las perturbaciones.

Figura 33 Análisis de temperatura en el Escenario 6 Espacio de Estados



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales.

Figura 34 Análisis Temp. en Espacio de Estados 6 con Perturbación

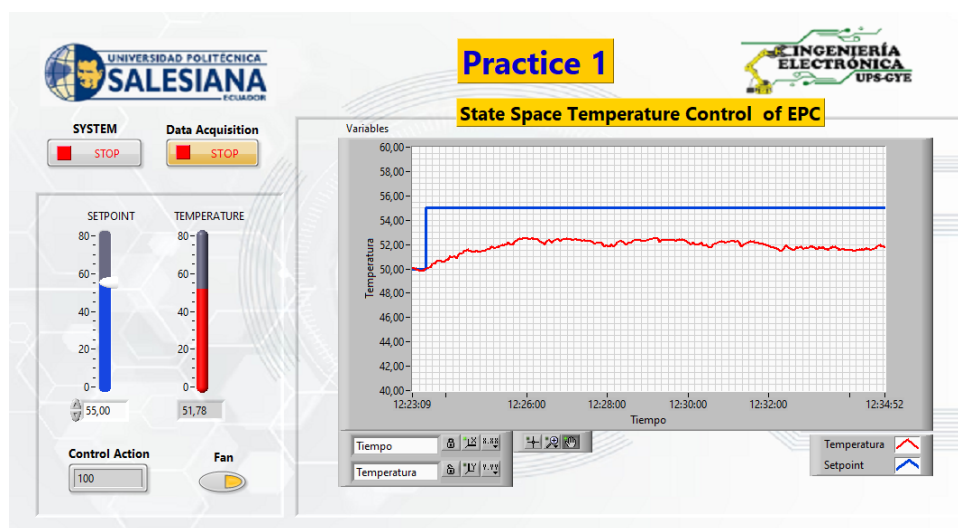


Nota: Se genero un overshoot de 5% debido a la perturbación y su tiempo de estabilización es de 3 min.

4.4.7 Escenario 7 Espacio Estados Setpoint 55°C

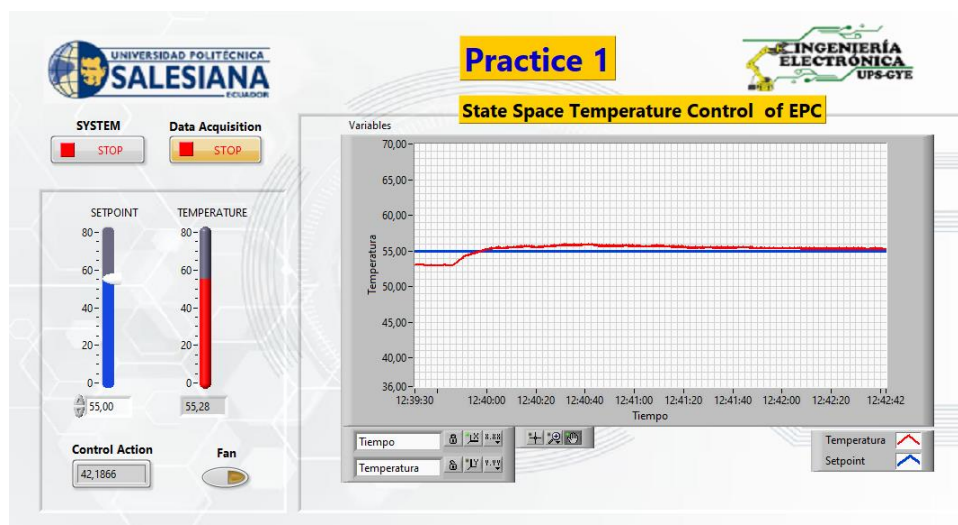
En el último escenario, con una temperatura inicial de 50°C y un setpoint de 55°C, el sistema no se logró estabilizar alcanzando como temperatura máxima 51.78°C como se muestra en la figura 35, al momento de inducir una perturbación este logro estabilizarse luego de 0.30 minutos empezando desde los 51.78°C como se muestra en la figura 36, esto demuestra que nuestro controlador no puede ajustar eficazmente la temperatura a niveles más altas debido a las limitaciones físicas ya que no posee un sistema de calentamiento más potente.

Figura 35 Análisis de temperatura en el Escenario 7 Espacio de Estados



Nota: La planta no logro estabilizarse en condiciones ideales.

Figura 36 Análisis Temp. en Espacio de Estados 7 con Perturbación



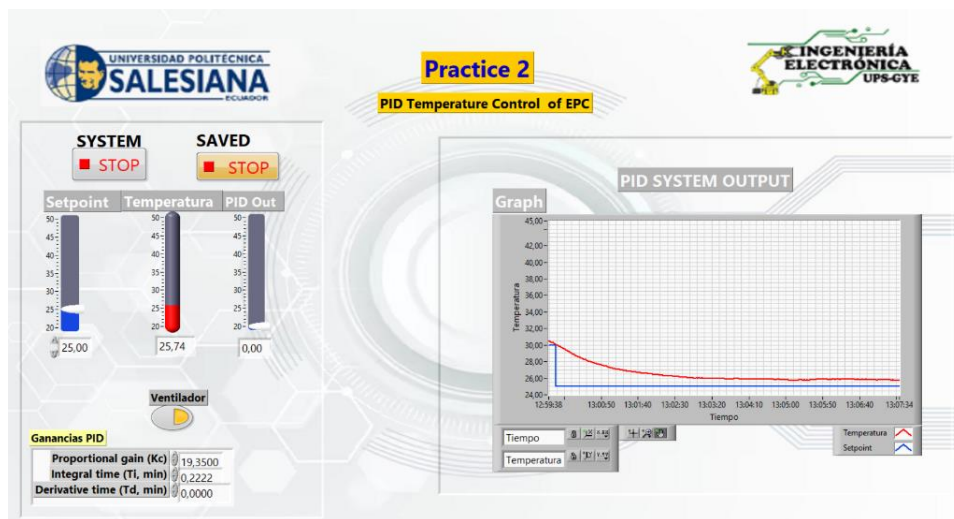
Nota: La planta logro estabilizarse luego de la perturbación debido a que esta consiste en apagar el ventilador de disipación.

4.5 Análisis en los escenarios seleccionados del controlador en PID

4.5.1 Escenario 1 PID Setpoint 25°C

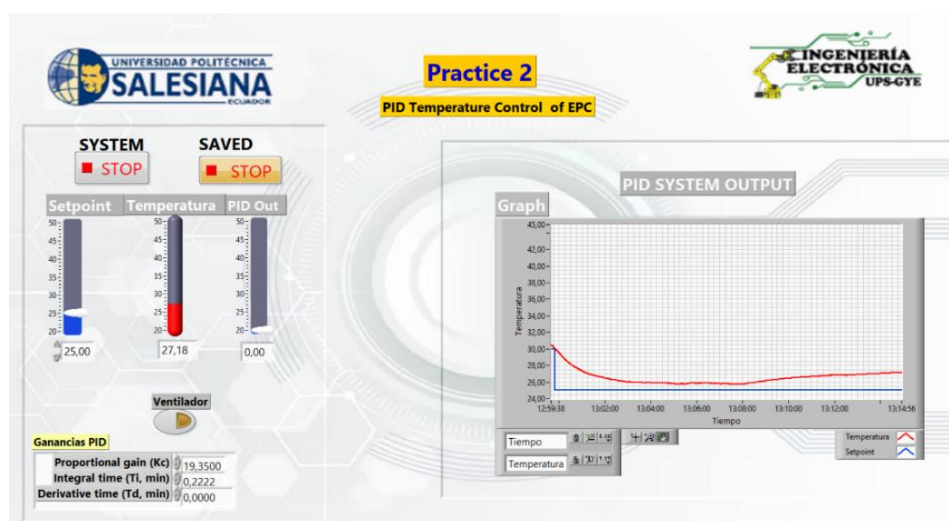
En el primer escenario, se estableció un setpoint de 25°C. Durante la prueba, se observó que nuestra Planta (EPC) no logro llegar al setpoint deseado, la temperatura no logro bajar de 26.81°C en condiciones ideales como se muestra en la figura 37 y que al inducirle una perturbación es decir apagando el ventilador la temperatura se mantuvo como se muestra en la figura 38, esto demuestra que nuestro controlador no puede ajustar eficazmente la temperatura a niveles más bajos debido a las limitaciones físicas ya que no posee un sistema de enfriamiento.

Figura 37 Análisis de temperatura en el Escenario 1 PID



Nota: En condiciones ideales sin perturbación la planta llega al límite de inferior de 26.81°C

Figura 38 Análisis Temp. en Controlador PID 1 con Perturbación

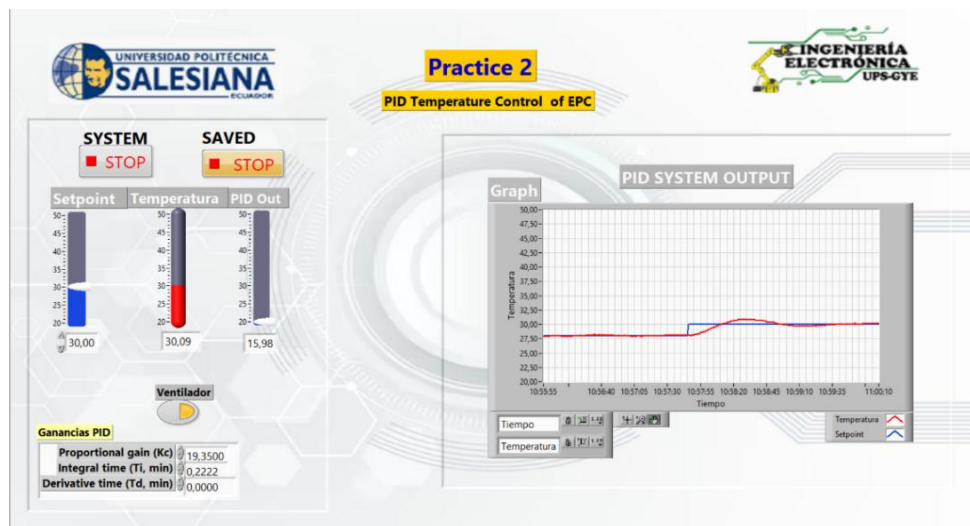


Nota: En la perturbación se observa la planta está alrededor de los 25.65 y no se estabiliza

4.5.2 Escenario 2 PID Setpoint 30°C

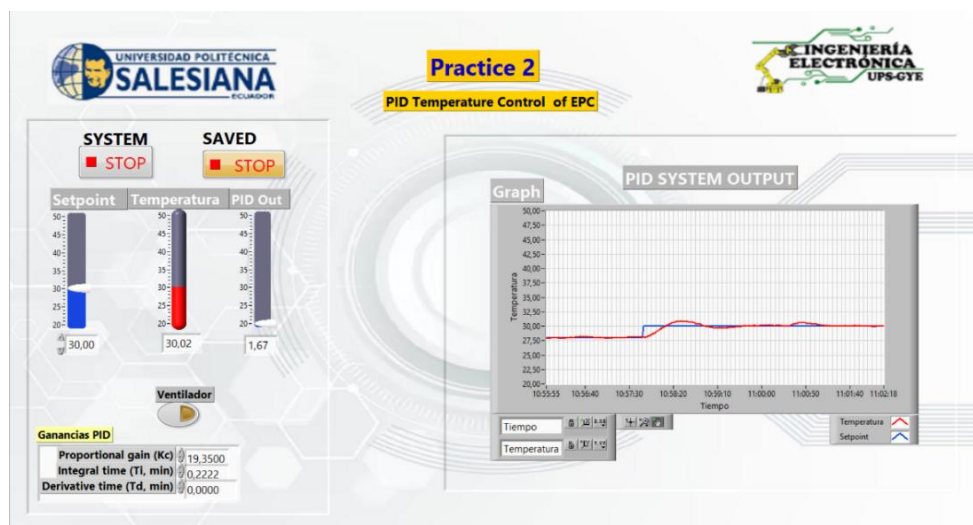
En el segundo escenario, el sistema comenzó con una temperatura inicial de 28°C y se estableció un setpoint de 30°C. Durante la prueba, se observó que el tiempo de estabilización fue de 1.10 minutos, se registró un sobre impulso con un overshoot del 2.67% como se muestra en la figura 39. Además, al introducir una perturbación, el sistema generó un overshoot del 1.83%, manteniéndose dentro del rango aceptable de estabilización como se muestra en la figura 40. Estos resultados demuestran la capacidad del controlador PID para manejar ajustes significativos en las condiciones de operación, asegurando una respuesta rápida y efectiva ante variaciones en el entorno.

Figura 39 Análisis de temperatura en el Escenario 2 PID



Nota: La planta logra estabilizarse en 1.10 minutos bajo condiciones óptimas.

Figura 40 Análisis Temp. en Controlador PID 2 con Perturbación

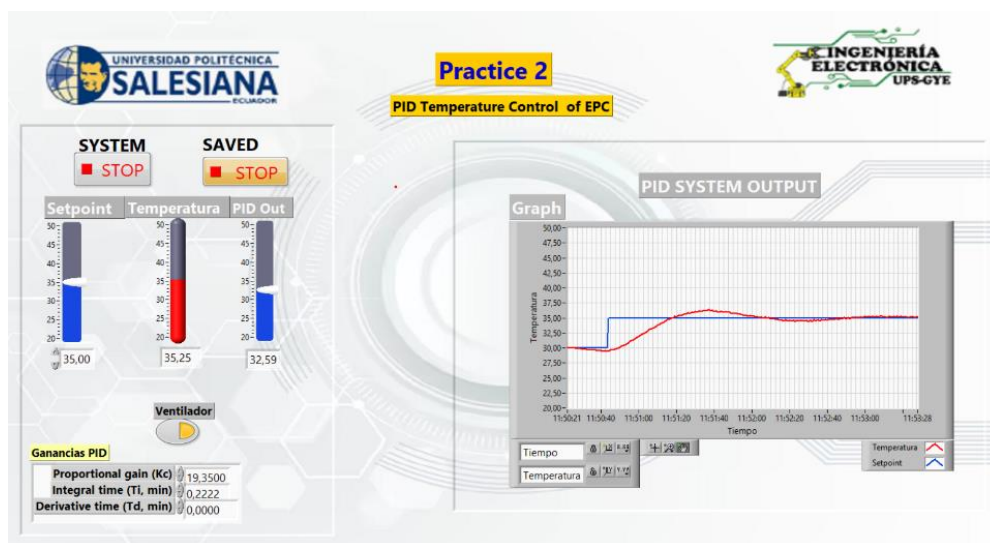


Nota: Al inducirle una perturbación se generó un overshoot de 1.83%

4.5.3 Escenario 3 PID Setpoint 35°C

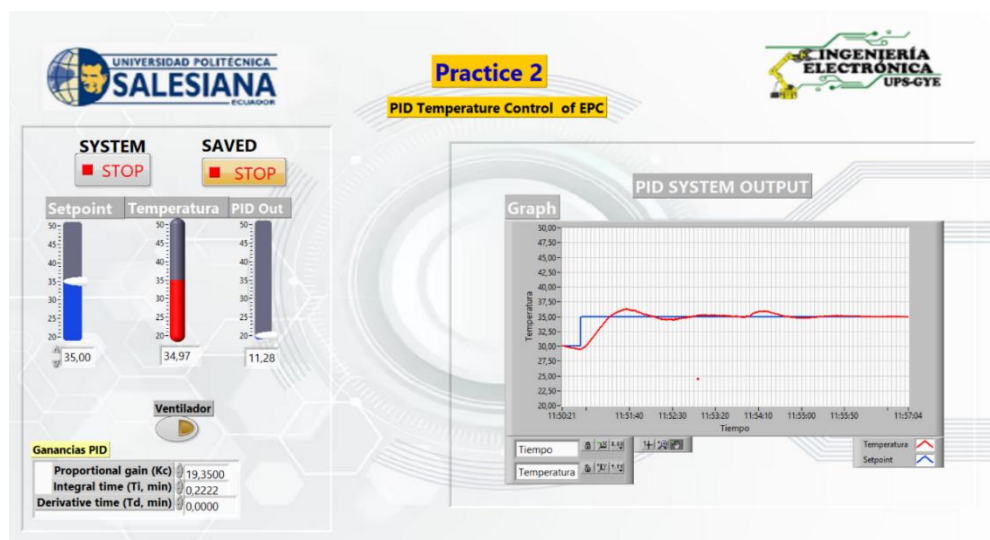
En el tercer escenario, la prueba inició con una temperatura de 30°C y se estableció un setpoint de 35°C, el sistema alcanzó la estabilización en 1.10 minutos, logrando mantener la temperatura en el setpoint deseado con un overshoot del 2.6% como se muestra en la figura 41. A pesar de ser sometido a una perturbación, el sistema generó un overshoot adicional del 0.65%, manteniéndose estable como se muestra en la figura 42. Estos resultados evidencian la capacidad del controlador PID para gestionar ajustes significativos en las condiciones operativas, asegurando una respuesta eficiente y precisa ante variaciones externas.

Figura 41 Análisis de temperatura en el Escenario 3 PID



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales

Figura 42 Análisis Temp. en Controlador PID 3 con Perturbación

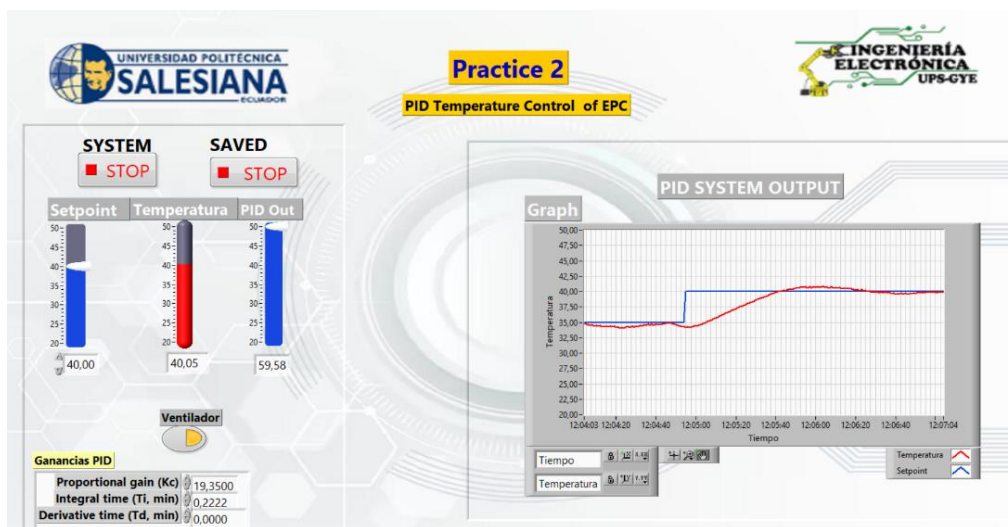


Nota: Al inducirle una perturbación se elevó a 35,23°C con un overshoot de 0.65%

4.5.4 Escenario 4 PID Setpoint 40°C

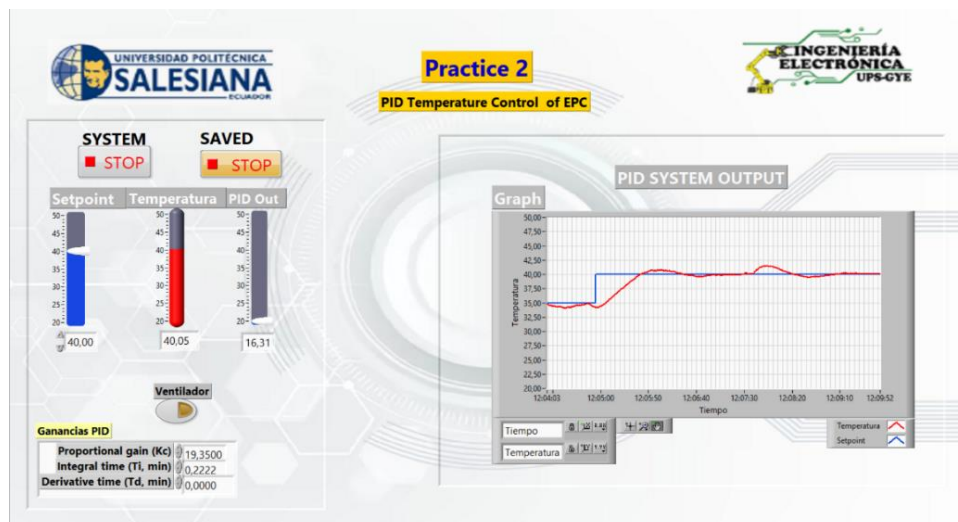
En el cuarto escenario, el sistema inició con una temperatura de 35°C y se fijó un setpoint de 40°C. El tiempo requerido para alcanzar la estabilización fue de 1.20 minutos, con un overshoot del 2.04% como se muestra en la figura 43. Al ser sometido a una perturbación, el sistema generó un overshoot adicional del 3.82%, superando el rango de estabilidad por 0.8 min, en este punto vemos una ligera disminución el tiempo de estabilización al ocurrir una perturbación como se muestra en la figura 44.

Figura 43 Análisis de temperatura en el Escenario 4 PID



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales

Figura 44 Análisis Temp. en Controlador PID 4 con Perturbación

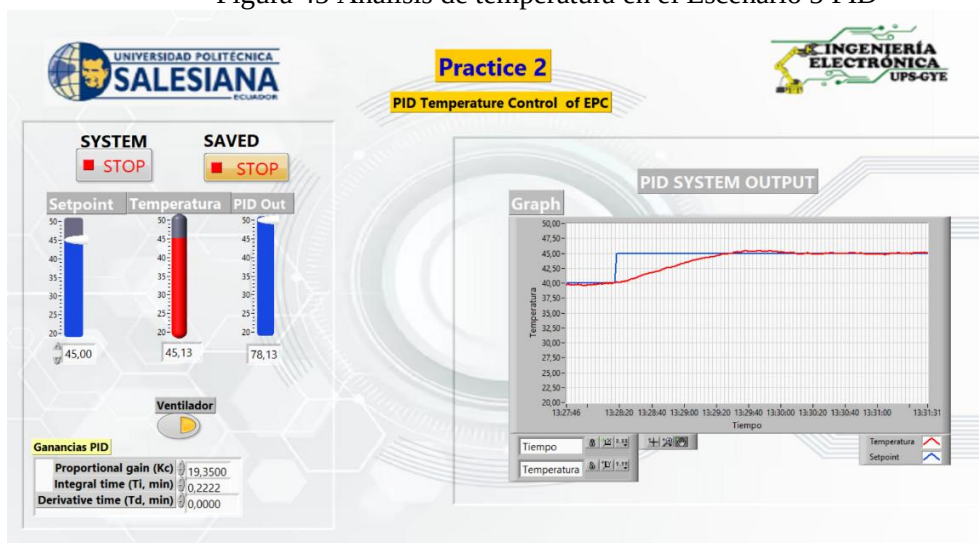


Nota: Al inducirle una perturbación se elevó a 40,05°C con un overshoot de 3.82%

4.5.5 Escenario 5 PID Setpoint 45°C

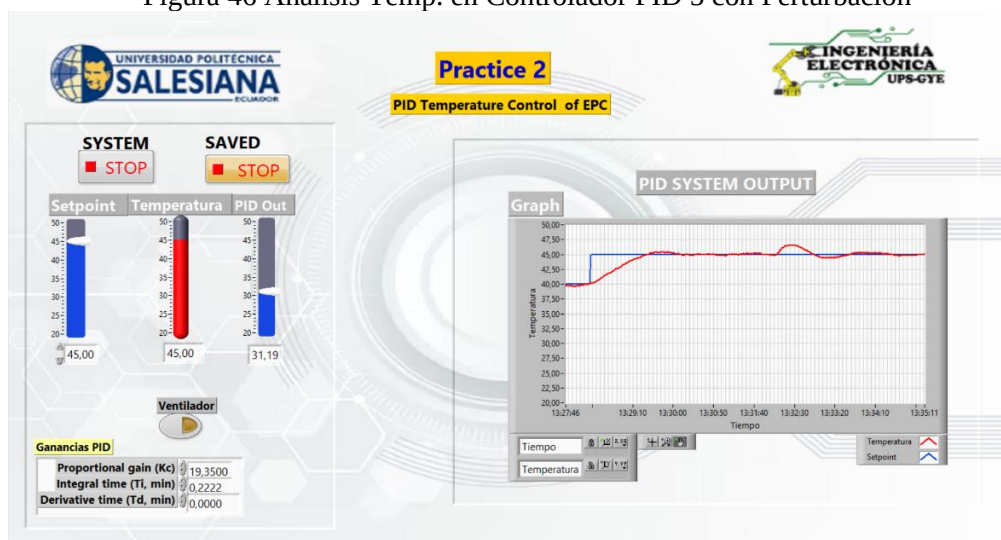
En el quinto escenario, con una temperatura inicial de 40°C y un setpoint de 45°C, el tiempo de estabilización fue de 1.40 minutos, mientras que el sobre impulso alcanzó el 1.05% como se muestra en la figura 45. Al ser sometido a una perturbación, el sistema generó un overshoot adicional del 3.27%, superando el rango de estabilidad por 1 min, en este punto vemos una ligera disminución el tiempo de estabilización al ocurrir una perturbación como se muestra en la figura 46.

Figura 45 Análisis de temperatura en el Escenario 5 PID



Nota: La planta se estabiliza en 1 min con condiciones ideales

Figura 46 Análisis Temp. en Controlador PID 5 con Perturbación

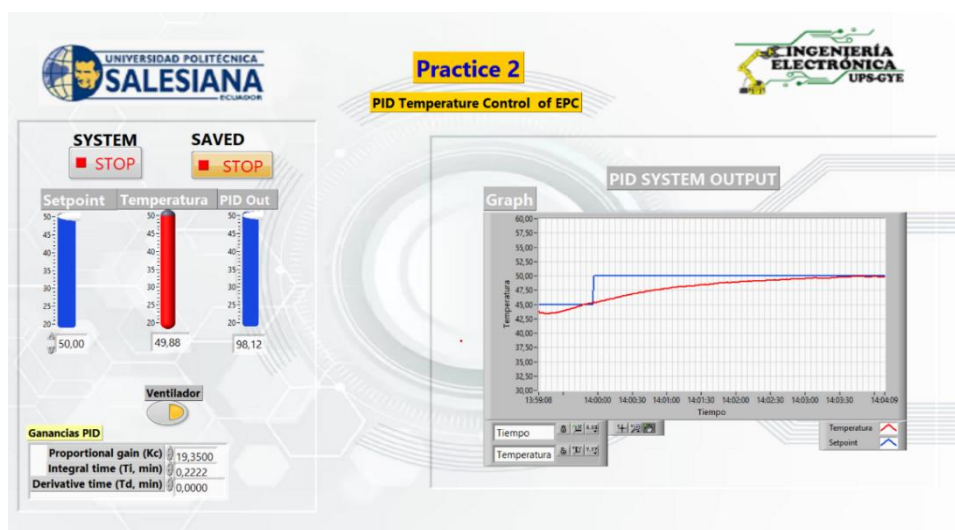


Nota: Se genero un overshoot de 3,27% debido a la perturbación, con un tiempo de estabilización es de 1 minutos

4.5.6 Escenario 6 PID Setpoint 50°C

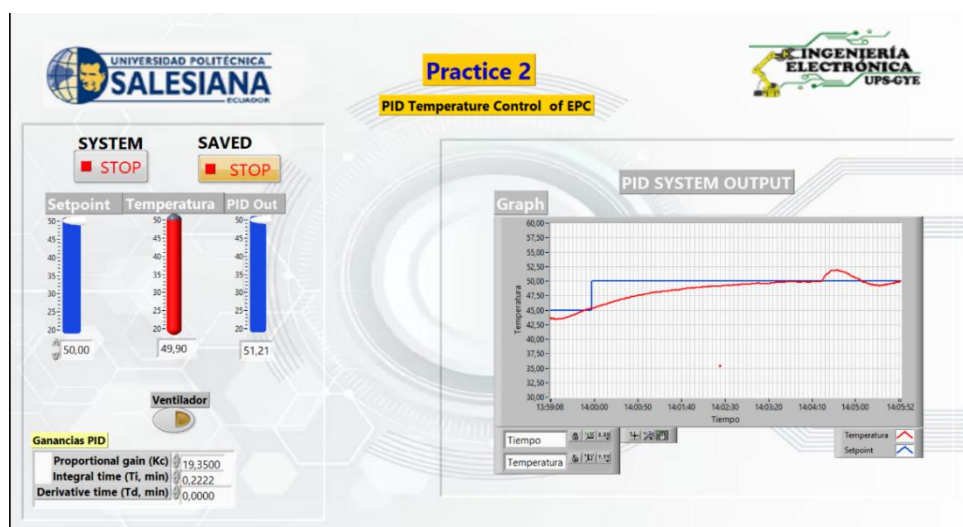
En el sexto escenario, comenzando con una temperatura inicial de 45°C y un setpoint de 50°C, el sistema alcanzó la estabilización en 2 minutos sin presentar overshoot, ya que el overshoot fue del 0% como se muestra en la figura 47. Al ser sometido a una perturbación, el sistema generó un overshoot del 4.5%, Pero controlando en un tiempo de 0.7 min como se muestra en la figura 48, lo cual demuestra que en este punto de operación el control es menos preciso al existir perturbaciones.

Figura 47 Análisis de temperatura en el Escenario 6 PID



Nota: La planta se estabiliza en 2 minutos con condiciones ideales

Figura 48 Análisis Temp. en Controlador PID 6 con Perturbación

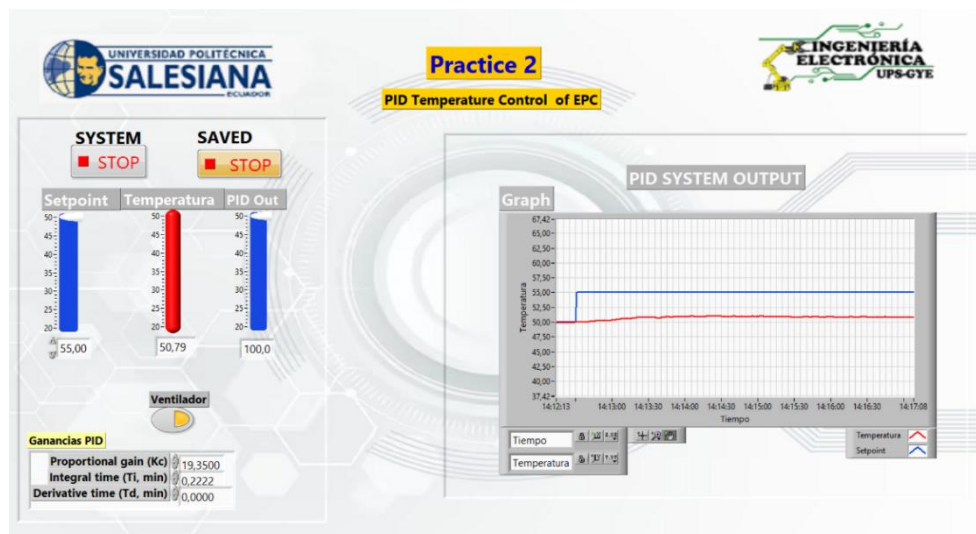


Nota: El sistema mostró un overshoot del 4.5% debido a la perturbación, estabilizándose en 0.7 minutos

4.5.7 Escenario 7 PID Setpoint 55°C

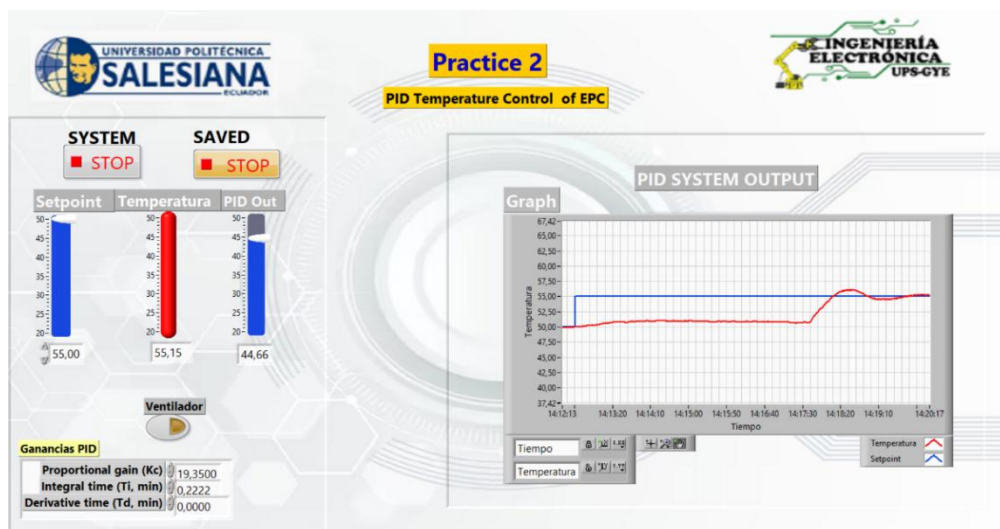
En el último escenario, con una temperatura inicial de 50°C y un setpoint de 55°C, el sistema no se logró estabilizar alcanzando como temperatura máxima 50.79°C como se muestra en la figura 49, al momento de inducir una perturbación este logro estabilizarse luego de 0.30 minutos empezando desde los 50.79°C como se muestra en la figura 50, esto demuestra que nuestro controlador puede ajustar eficazmente la temperatura a niveles más altas debido a las limitaciones físicas ya que no posee un sistema de calentamiento más potente.

Figura 49 Análisis de temperatura en el Escenario 7 PID



Nota: La planta no consiguió alcanzar la estabilización bajo condiciones óptimas.

Figura 50 Análisis Temp. en Controlador PID 7 con Perturbación



Nota: Se observó un sobreimpulso del 2.10% debido a la perturbación, con un tiempo de estabilización de 1.20 minutos

4.6 Análisis comparativo de los controladores PID y Espacio de Estados

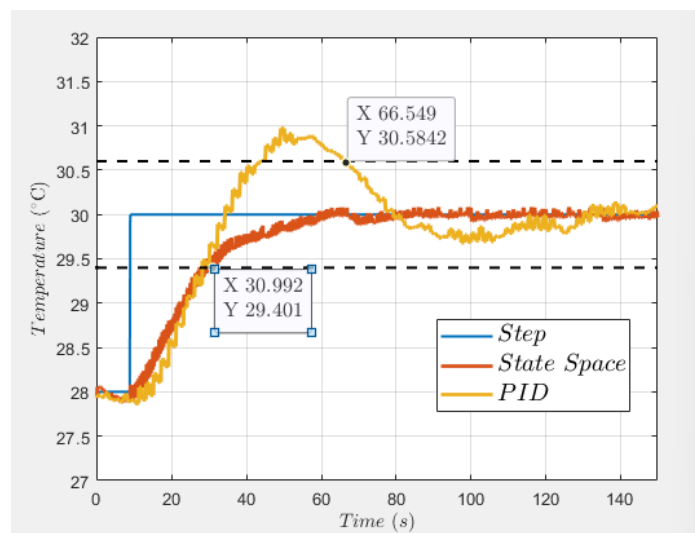
Se realizó 4 adquisiciones de datos de cada controlador en los siguientes rangos:

- Setpoint desde 28°C hasta 30°C
- Setpoint desde 30°C hasta 35°C
- Setpoint desde 35°C hasta 40°C
- Setpoint desde 30°C hasta 40°C

4.6.1 Comparativa Setpoint 28-30°C

En el primer escenario, se estableció un setpoint de 30°C. Para el controlador en el espacio de estados, se observó que la Planta (EPC) logró estabilizarse en 0.4 minutos sin presentar overshoot, lo que demuestra su capacidad de ajuste rápido y preciso a este setpoint. Por otro lado, el controlador PID tardó 1 minuto en estabilizarse y presentó un overshoot del 3.33%, como se muestra en la Figura 51. Este resultado muestra el controlador en el espacio de estados ofrece una respuesta más rápida y sin overshoot en comparación con el PID en este escenario.

Figura 51 Análisis de la comparativa 1 entre el Espacio de Estados y PID

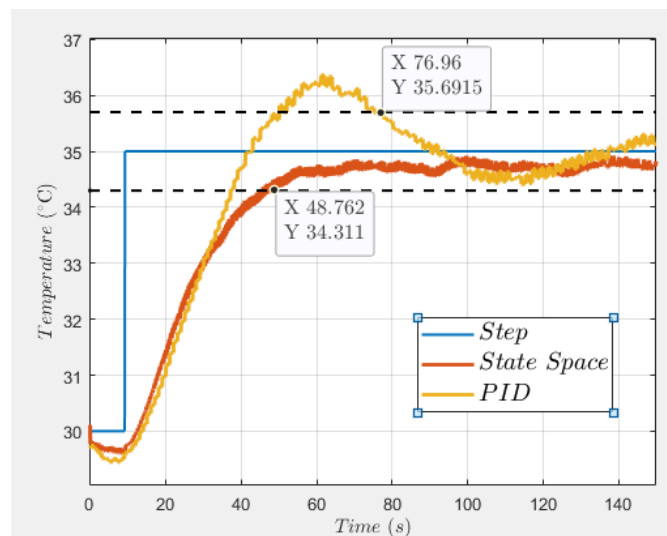


Nota: Para este escenario el controlador de espacio de estados resultó más efectivo que el PID

4.6.2 Comparativa Setpoint 30-35°C

En el segundo escenario, se estableció un setpoint de 35°C. El controlador en el espacio de estados logró estabilizarse en 0.48 minutos sin overshoot, destacando su eficiencia en el ajuste de la temperatura. El controlador PID, en cambio, se estabilizó en 0.51 minutos con un overshoot del 4%. Se muestra en la Figura 52 la diferencia en el comportamiento de los controladores, destacando nuevamente la superioridad del controlador en el espacio de estados en términos de tiempo de estabilización y ausencia de overshoot.

Figura 52 Análisis de la comparativa 2 entre el Espacio de Estados y PID

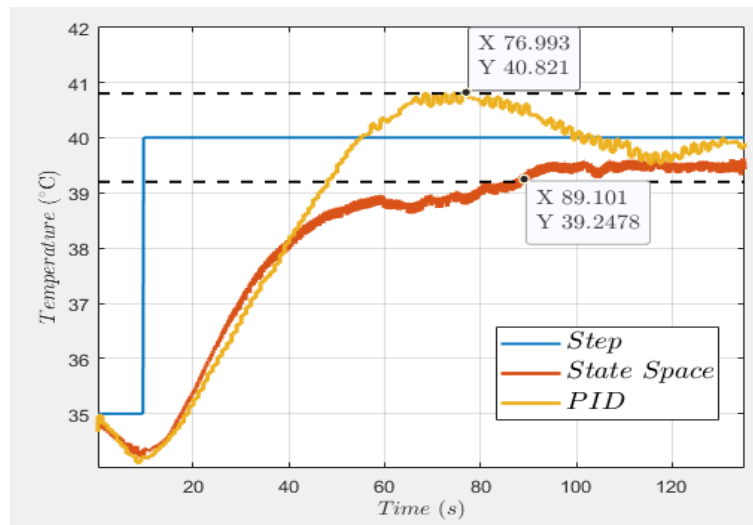


Nota: Para este escenario el controlador de espacio de estados resultó más efectivo que el PID

4.6.3 Comparativa Setpoint 35-40°C

En el tercer escenario, se estableció un setpoint de 40°C. El controlador en el espacio de estados alcanzó la estabilización en 1.41 minutos sin presentar overshoot. El controlador PID, por otro lado, se estabilizó en 1.2 minutos con un overshoot del 2.05%. Aunque el tiempo de estabilización del controlador PID fue ligeramente mejor, la ausencia de overshoot en el controlador en el espacio de estados sigue siendo una ventaja significativa. La Figura 53 ilustran esta comparación y la respuesta de cada controlador.

Figura 53 Análisis de la comparativa 3 entre el Espacio de Estados y PID

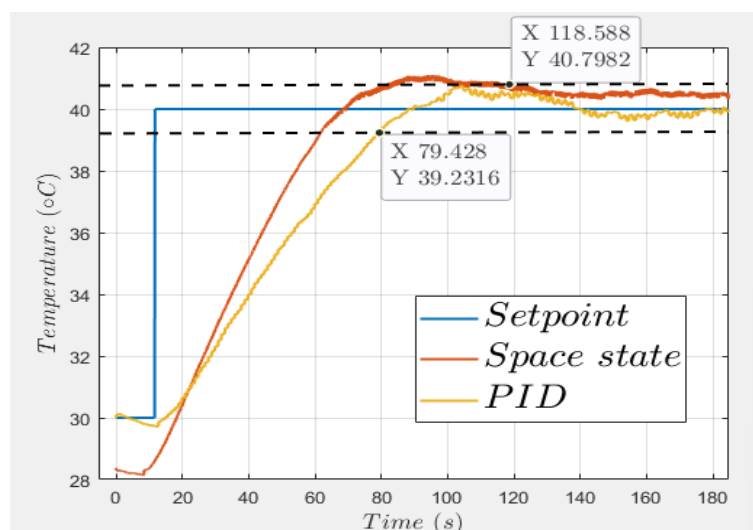


Nota: Para este escenario el controlador PID resulto más efectivo que el Espacio de Estados

4.6.4 Comparativa Setpoint 30-40°C

En el cuarto escenario, se estableció un setpoint de 40°C. El controlador en el espacio de estados logró estabilizarse en 1.89 minutos sin presentar overshoot, mostrando su capacidad para manejar mayores cambios de temperatura. El controlador PID, sin embargo, se estabilizó en 1.23 minutos con un overshoot del 2.75%. La Figura 54 demuestra esta diferencia en el desempeño, subrayando que, aunque el PID puede estabilizarse más rápido en algunos casos, el controlador en el espacio de estados ofrece una estabilidad sin overshoot, lo cual es crucial para aplicaciones donde la precisión es fundamental.

Figura 54 Análisis de la comparativa 4 entre el Espacio de Estados y PID



Nota: Para este escenario el controlador de PID resulto más efectivo que el Espacio de Estados

4.7 Resultados de Pruebas y Análisis de Datos

4.7.1 Resultados de prueba con el controlador de Espacio de Estados

Se realizaron las pruebas en el controlador de Espacio de Estados, detallando los datos en la Tabla 3:

Escenario	Temperatura inicial	Setpoint	Tiempo de Estabilización	Overshoot	Tiempo de estabilización con Perturbación	Overshoot Con Perturbación
1	27°C	25°C	Fuera alcance	-	-	-
2	27°C	30°C	0.7 min	0%	0 min	1,5%
3	30°C	35°C	1 min	0%	4 min	2,57%
4	35°C	40°C	1 min	0%	3 min	6,25%
5	40°C	45°C	1.2 min	1,78%	2.5 min	3,33%
6	45°C	50°C	2.5 min	1,4%	3 min	5%
7	50°C	55°C	Fuera alcance	-	-	-

Tabla 2 Recolección de datos del controlador de Espacio de Estados

4.7.2 Resultados de prueba con el controlador PID

Se realizaron las pruebas en el controlador de PID, detallando los datos en la Tabla 4:

Escenario	Temperatura inicial	Setpoint	Tiempo de Estabilización	Overshoot	Tiempo de estabilización con Perturbación	Overshoot Con Perturbación
1	30°C	25°C	Fuera alcance	-	-	-
2	28°C	30°C	1.10 min	2,67%	0 min	1,83%
3	30°C	35°C	1.15 min	2,6%	0 min	0,65%
4	35°C	40°C	1.20 min	2,04%	0.8 min	3,82%
5	40°C	45°C	1.40 min	1,05%	1 min	2,91%
6	45°C	50°C	2 min	0%	0.7 min	4,5%
7	50°C	55°C	Fuera alcance	-	-	-

Tabla 3 Recolección de datos del controlador de PID

4.7.3 Resultados de prueba comparativa Espacio de Estados y PID

Se realizaron las pruebas en el controlador de Espacio de Estados versus el PID, detallando los datos en la Tabla 5:

Escenario	Temperatura Inicial	Setpoint	Tiempo de Estabilización Espacio de Estados	Overshoot Espacio de Estados	Tiempo de Estabilización PID	Overshoot PID
1	28°C	30°C	0.4min	0%	1min	3,33%
2	30°C	35°C	0.48min	0%	0.51min	4%
3	35°C	40°C	1.41min	0%	1.2min	2,05%
1	28°C	30°C	0.4min	0%	1min	3,33%

Tabla 4 Recolección de datos de la comparativa de los dos controladores

4.8 Guía o manual de Prácticas de Laboratorio

4.8.1 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador en el Espacio de Estados mediante LabVIEW

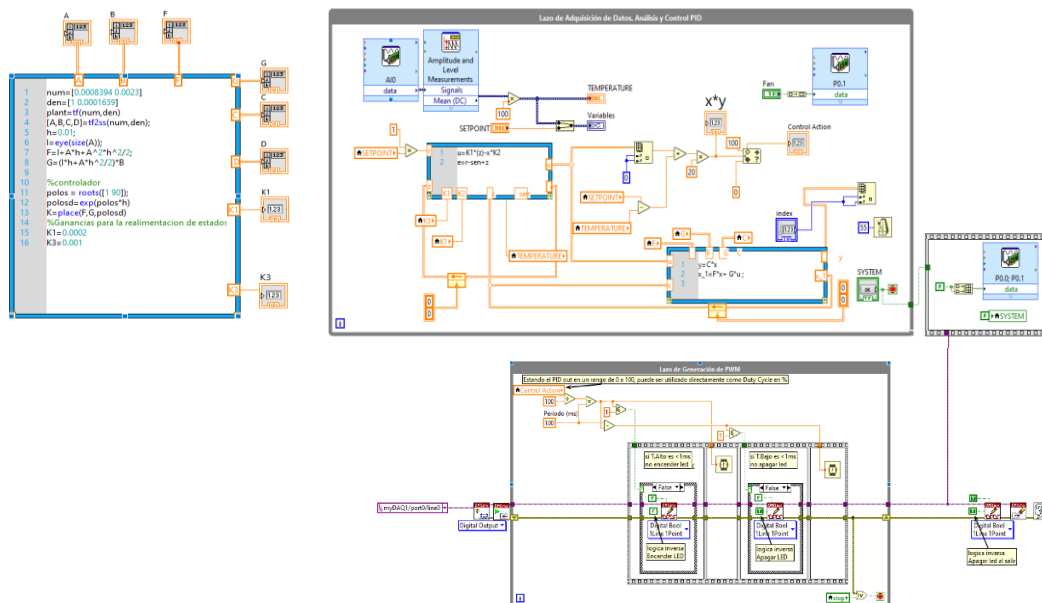
 GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO		
CARRERA: Ingeniería Electrónica.		ASIGNATURA: Instrumentación y Teoría de Control
No.:	1	TÍTULO: Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador en el Espacio de Estados mediante LabVIEW.
OBJETIVOS: • Establecer la conexión entre el entrenador de planta de control EPC con una tarjeta NI myDAQ • Configurar de manera adecuada el entorno en LabVIEW para la implementación del Controlador en el Espacio de Estados. • Emplear las herramientas de diseño de LabVIEW para desarrollar el Controlador en el Espacio de Estados. • Ajustar los parámetros y las ganancias del Controlador para optimizar su rendimiento.		
INSTRUCCIONES:		1. Emplear las herramientas de LabVIEW para el diseño y la implementación del Controlador en el Espacio de Estados, específicamente para el sistema de control de Temperatura.
		2. Modificar las ganancias y los parámetros del Controlador según sea necesario para mejorar el rendimiento del sistema.

3. Llevar a cabo pruebas iniciales para asegurar que el Controlador funcione conforme a las especificaciones del diseño.

DESARROLLO

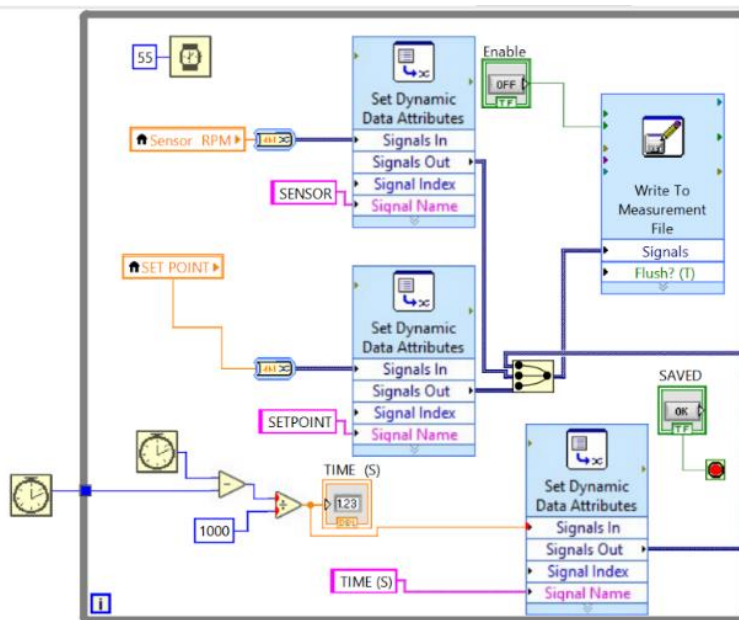
Programación en LabVIEW:

El bloque MathScript en LabVIEW permite la incorporación de código personalizado, lo que facilita la obtención de datos del sistema, la discretización de señales y el cálculo de las ganancias para la retroalimentación de estados mediante la asignación de polos específicos. Esta herramienta es esencial para ajustar y perfeccionar el rendimiento del sistema de control, ya que permite realizar cálculos complejos y ajustes precisos. Gracias a su funcionalidad, se puede optimizar el sistema para que responda con la máxima precisión y eficiencia.

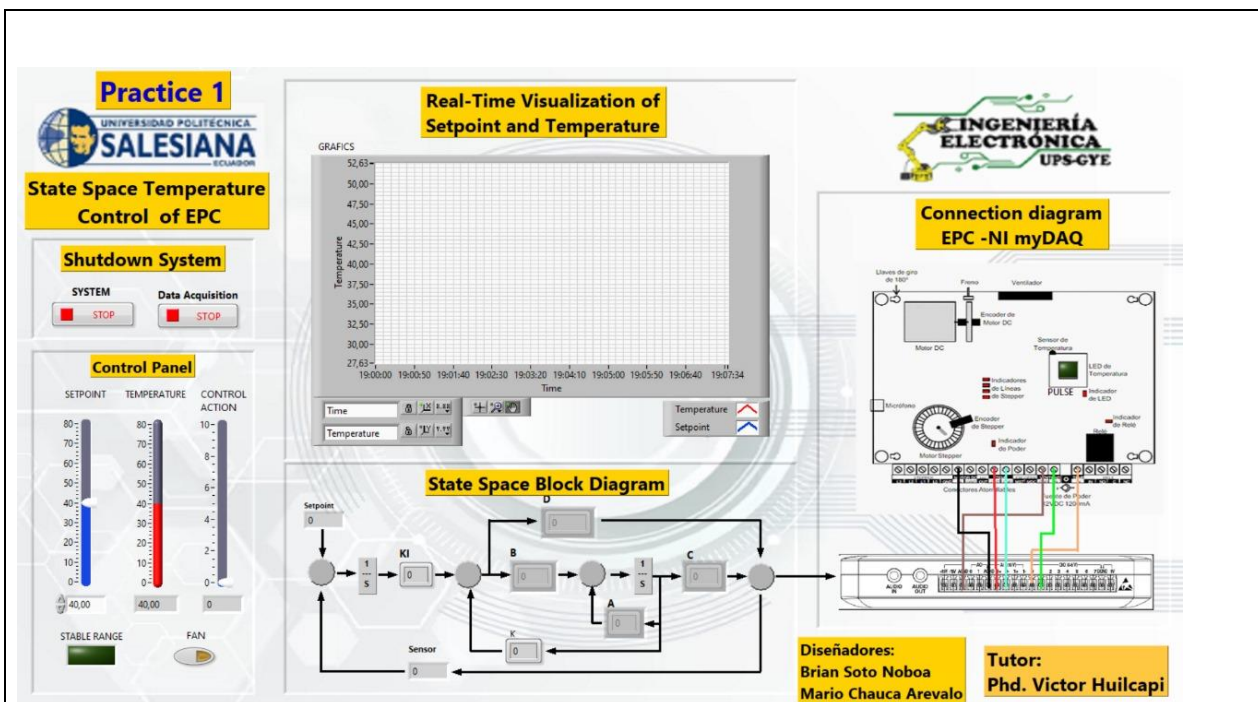


En el diagrama de bloques, los While Loops representan los ciclos donde el sistema se ejecuta continuamente. En el primer While Loop, se definen dos Math Scripts: uno donde se especifica la acción de control del sistema y otro que representa el Espacio de Estados, además de incluir la adquisición de datos. El segundo While Loop se encarga de la generación del PWM.

Finalmente, se incluye un tercer While Loop que permite guardar la información del sistema en un libro de Excel. Este bucle asegura que los datos recopilados durante la ejecución del sistema se registren y almacenen de manera continua, facilitando el análisis posterior y la generación de reportes detallados.



Interfaz de la práctica 1



ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

1. Determinar el Espacio de Estados del sistema para el control de temperatura en una planta EPC.

2. Establecer un polinomio característico arbitrario que permita optimizar la respuesta del sistema.

3. Calcular las ganancias óptimas para la retroalimentación de estados.

RESULTADOS:

- Evaluación de las variables del sistema en el Espacio de Estados.
- Controlar la Temperatura de una planta didáctica EPC mediante un Controlador en el Espacio de Estados.
- Obtención datos del sistema para recopilar información esencial y visualizarla en Matlab.

CONCLUSIONES:

- La selección de los polos tiene un impacto directo en la estabilidad y en la respuesta transitoria del sistema, siendo fundamental encontrar un equilibrio adecuado para alcanzar un rendimiento óptimo.

- La retroalimentación de estados juega un papel esencial en la mejora de la estabilidad y en la capacidad del sistema para manejar perturbaciones, subrayando su importancia en el control eficiente de la planta didáctica EPC.

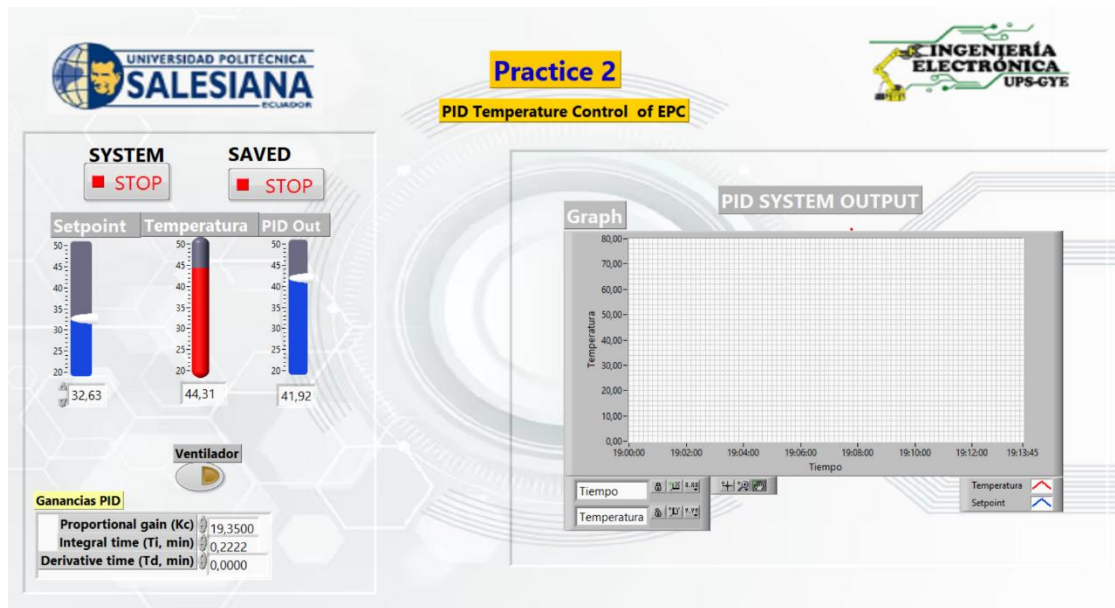
RECOMENDACIONES:

- Elegir los polos del controlador cuidadosamente para equilibrar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema.
- Monitorear el sistema para detectar cualquier necesidad de ajuste y garantizar un rendimiento constante y estable.

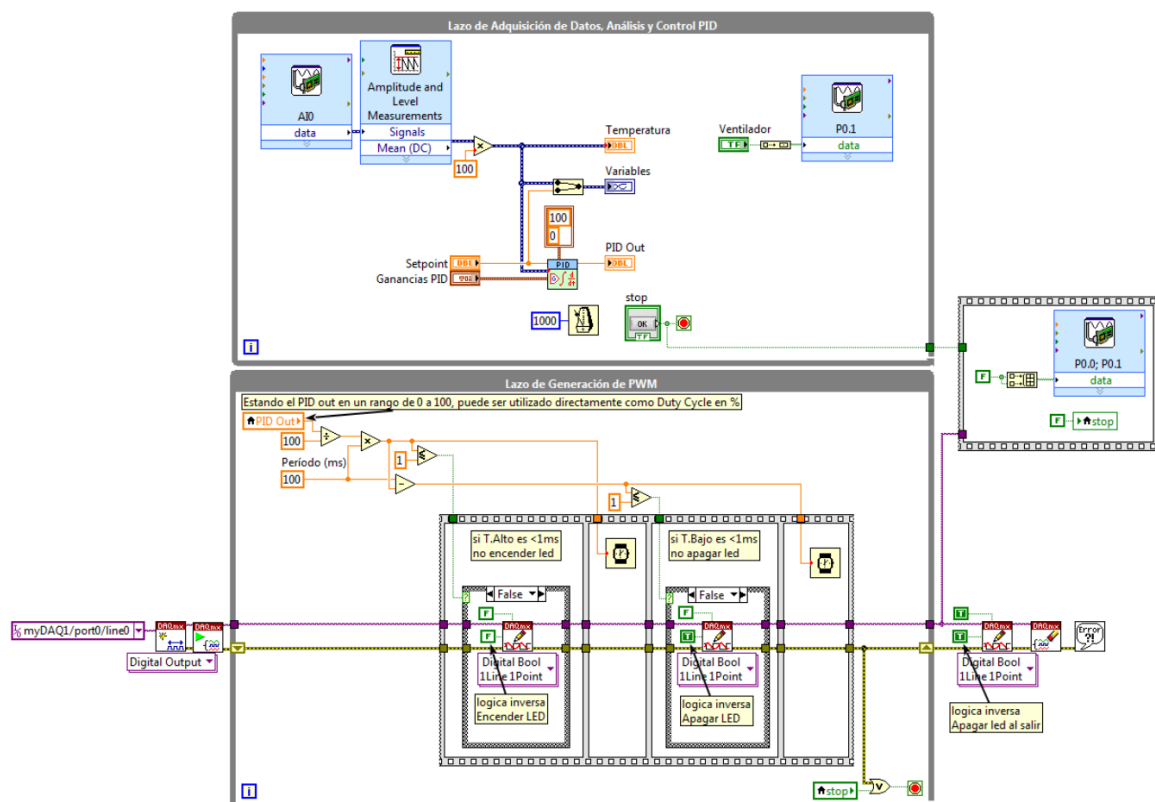
4.8.2 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador PID mediante LabVIEW.

 GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO		
CARRERA: Ingeniería Electrónica.		ASIGNATURA: Instrumentación y Teoría de Control.
No.:	2	TÍTULO: Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador PID mediante LabVIEW.
OBJETIVOS: • Establecer la conexión entre el entrenador de planta de control (EPC) con una tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ • Configurar de manera adecuada el entorno en LabVIEW para la implementación del Controlador PID. • Emplear las herramientas de diseño disponibles en LabVIEW para desarrollar el Controlador PID.		

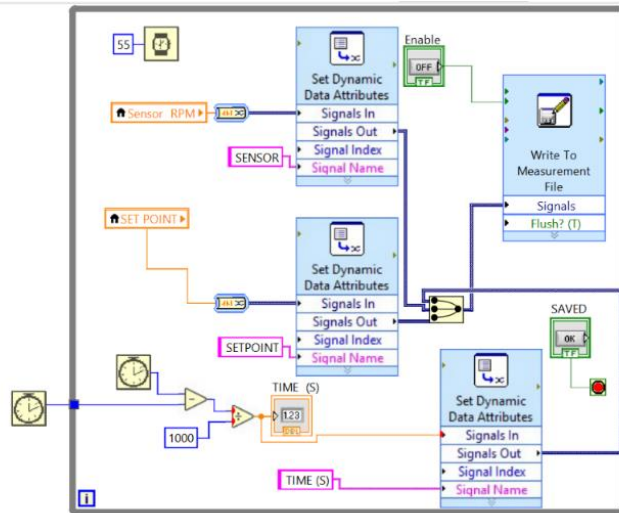
Ajustar los parámetros y las ganancias del Controlador para maximizar su rendimiento.	
INSTRUCCIONES:	1. Emplear las herramientas de LabVIEW para diseñar e implementar el Controlador PID destinado al sistema de control de temperatura en la planta didáctica EPC.
	2. Modificar las ganancias y parámetros del Controlador según sea necesario para mejorar el rendimiento del sistema.
	3. Realizar pruebas iniciales para confirmar que el Controlador opera conforme a las especificaciones del diseño.
DESARROLLO Programación en LabVIEW: Ganancias PID: El bloque de control “Ganancias PID” en el Panel Frontal permite ingresar los parámetros necesarios para la configuración del sistema. Esto incluye la definición de las matrices de PID y de salida, así como la asignación de polos arbitrarios para obtener las ganancias de la realimentación del PID. Posteriormente, se inicia el programa con un Setpoint definido, asegurándose de que el sistema esté en una condición de estabilidad antes de realizar ajustes adicionales.	



En el diagrama de bloques, los While Loops representan los ciclos donde el sistema se ejecuta continuamente. El primer While Loop incluye la representación del control PID y la adquisición de datos, mientras que el segundo While Loop se encarga de la generación del PWM.



Finalmente, se incluye un tercer While Loop que permite guardar la información del sistema en un libro de Excel. Este bucle asegura que los datos recopilados durante la ejecución del sistema se registren y almacenen de manera continua, facilitando el análisis posterior y la generación de reportes detallados.



ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

1. Determinar el controlador PID para el sistema de control de temperatura en una planta didáctica EPC.

2. Establecer un polinomio característico arbitrario que facilite una mejora en la respuesta del sistema.

3. Calcular las ganancias óptimas para la retroalimentación del PID, asegurando que el controlador funcione de manera efectiva y eficiente.

RESULTADOS:

- Evaluar las variables del sistema en relación con el PID.
- Regular la temperatura de una planta didáctica EPC utilizando un Controlador PID.
- Recopilar datos del sistema para obtener información crucial y visualizarla en MATLAB.

CONCLUSIONES:

- La selección de los polos tiene un impacto directo en la estabilidad y en la respuesta transitoria del sistema, por lo que es crucial encontrar un equilibrio adecuado para lograr un rendimiento óptimo.
- La retroalimentación del PID resulta fundamental para mejorar la estabilidad del sistema y mitigar las perturbaciones, subrayando su importancia en el control eficiente de la planta didáctica EPC.

RECOMENDACIONES:

- Elegir los polos del Controlador con cuidado para lograr un equilibrio adecuado entre estabilidad y respuesta transitoria.
- Monitorear el sistema para detectar cualquier necesidad de ajuste y garantizar un rendimiento constante y estable.

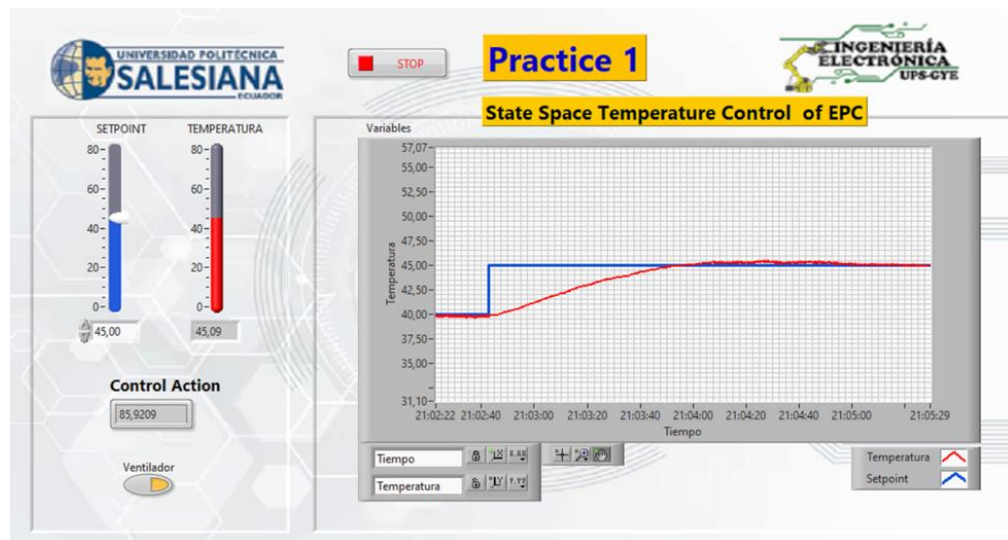
4.8.3 Diseño y Análisis de un Sistema de Control de Temperatura para una planta didáctica (EPC) utilizando un Controlador en el Espacio de Estados mediante LabVIEW

		GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
CARRERA: Ingeniería Electrónica.			ASIGNATURA: Instrumentación y Teoría de Control
No.:	3	TÍTULO: Análisis Comparativo de Controladores PID y Espacio de Estados en el Sistema de Temperatura de la planta EPC mediante MATLAB.	
OBJETIVOS: • Implementar prácticas tanto de Controladores PID como de Controladores en el Espacio de Estados en el sistema de control de temperatura de una planta EPC. • Recopilar datos experimentales de los diferentes Controladores para obtener una visión detallada de su comportamiento dinámico en condiciones reales de operación. • Utilizar MATLAB para realizar un análisis exhaustivo y generar comparaciones gráficas de las respuestas de los tres tipos de Controladores. • Evaluar la optimización y ajuste de los parámetros de cada Controlador para mejorar la eficiencia y precisión en el control de la temperatura de la planta.			
INSTRUCCIONES:		1. Validar la correcta interconexión de todos los componentes del sistema y garantizar la disponibilidad de la instrumentación adecuada para la adquisición precisa de datos.	
		2. Calibrar los parámetros de cada Controlador según sea necesario y verificar que todos estén en pleno funcionamiento para establecer un punto de referencia común antes de iniciar la recolección de datos.	

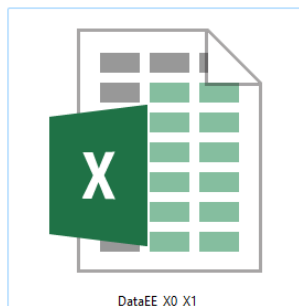
3. Emplear MATLAB para realizar un análisis y comparación detallada de las respuestas de los Controladores, produciendo gráficos que permitan identificar tendencias y discrepancias en el desempeño de cada uno.

DESARROLLO

1. Abrir la práctica 1 modificada del Controlador de estados
2. Configurar el punto de ajuste (Set Point) en el módulo Manual LabVIEW SP y activar el programa en modo de ejecución. Esto iniciará automáticamente la generación de la salida y la recopilación de un informe sobre las temperaturas registradas por el sensor LM35 en la planta.

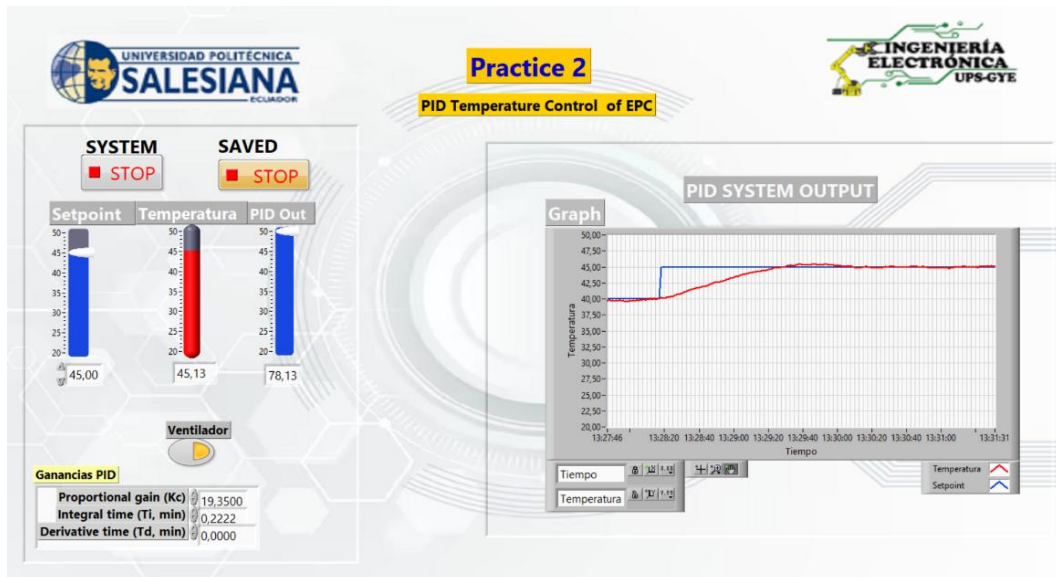


3. Una vez el sistema se apague, se genera un archivo .xlsx, el cual es recomendable renombrarlo ejemplo: ESTADOS_SP_XX

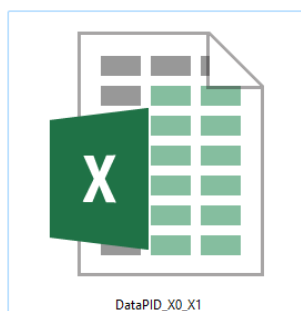


DataEE_X0_X1

4. Abrir la práctica 2 modificada del Controlador PID
5. Asignar el mismo punto de ajuste (Set Point) en el modo manual de LabVIEW y ejecutar el programa en modo de operación. Esto iniciará automáticamente la generación de la salida y la recopilación de un informe sobre las temperaturas registradas por el sensor LM35 en la planta.



6. Una vez el sistema se apague, se genera un archivo .xlsx, el cual es recomendable renombrarlo ejemplo: PID_SP_XX



7. Crear un archivo `.m` en MATLAB, asegurando que se encuentre en la misma carpeta que los archivos `.xlsx` de todos los Controladores, y ejecutar el código correspondiente.

Código Matlab:

```
close all
clear all
clc

%% Leer datos
[num, txt, raw] = xlsread("DataEE_35_40.xlsx");
[numf, txtf, rawf] = xlsread("DataPID_35_40.xlsx");

%% Definir la variable
variable = 40;

%% Crear figura
figure

% Graficar datos
plot(num(:,1), num(:,3), 'LineWidth', 1.5) %Step
hold on
plot(num(:,1), num(:,2), 'LineWidth', 2) %Espacio estados
plot(numf(:,1), numf(:,2), 'LineWidth', 2) %PID

% Graficar líneas adicionales
y1 = variable * 1.02; % Línea para límite superior de estabilidad
y2 = variable * 0.98; % Línea para límite inferior de estabilidad
x_range = [min(num(:,1)); max(num(:,1))]; % Rango del eje X basado en los
datos

plot(x_range, [y1; y1], 'k--', 'LineWidth', 1.5) % Línea negra discontinua
para y = variable * 1.02
plot(x_range, [y2; y2], 'k--.', 'LineWidth', 1.5) % Línea negra punteada
para y = variable * 0.98

hold off

% Añadir etiquetas y leyenda en LaTeX
xlabel('$Time~(s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$Temperature~(^{\circ}C)$', 'Interpreter', 'latex')
legend({'$Step$', '$State~Space$', '$PID$'}, ...
       'Interpreter', 'latex', 'Location', 'best', 'FontSize', 14)

grid on
xlim([0 135])
ylim([34 42])
```

Una vez ejecutado el código, se puede visualizar las respuestas del sistema con los diferentes Controladores siguiendo la misma referencia.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR
1. Monitorear y verificar que los parámetros estén correctamente ajustados, facilitando la comprensión de cómo influyen en la respuesta del sistema.
2. Supervisar en tiempo real el desempeño de cada Controlador y asegurar que los datos se estén registrando con precisión y fiabilidad.
3. Analizar y comparar las gráficas de las respuestas de los Controladores, resaltando patrones y diferencias significativas.
RESULTADOS: • Documentar las variaciones en las respuestas entre los Controladores PID y los Controladores en el Espacio de Estados. • Evaluar y comparar el rendimiento de cada Controlador en relación con el seguimiento de la temperatura deseada. • Analizar el impacto de modificaciones específicas en los parámetros sobre la respuesta del sistema.
CONCLUSIONES: • Determinar cuál de los métodos es más adecuado para el control de temperatura en la planta según las condiciones específicas de la práctica. • Analizar cómo el ajuste de diferentes parámetros influye directamente en la respuesta del sistema.
RECOMENDACIONES: • Analizar en profundidad el comportamiento de los Controladores mediante la exploración exhaustiva para entender cómo responde el sistema con cada tipo de Controlador. • Ejecutar la práctica con distintos perfiles de referencia de temperatura, permitiendo la comparación del desempeño de los Controladores frente a cambios graduales, rápidos e incluso inversos en la temperatura de referencia, para obtener una comprensión más completa de su rendimiento en diversas condiciones prácticas.

CRONOGRAMA

En el contexto del desarrollo del Proyecto de Titulación, se ha creado un plan detallado de actividades que se distribuye semanalmente. Este programa abarca un período prolongado de 10 semanas, que comienza en mayo y termina en julio, coincidiendo con el ciclo académico 64.

El cronograma actual se establece como una herramienta fundamental para dirigir y organizar el progreso del proyecto en sus diversas etapas. Su objetivo principal es guiar la ejecución de las tareas y fases del proyecto de manera eficiente y efectiva. Como se puede observar en la Tabla 6 la tarea que más tiempo nos toma en desarrollar es la implementación del proyecto por lo cual se espera que, al seguir esta planificación de forma rigurosa, se pueda completar todas las actividades programadas para la primera semana de agosto, coincidiendo con la fecha de presentación del proyecto.

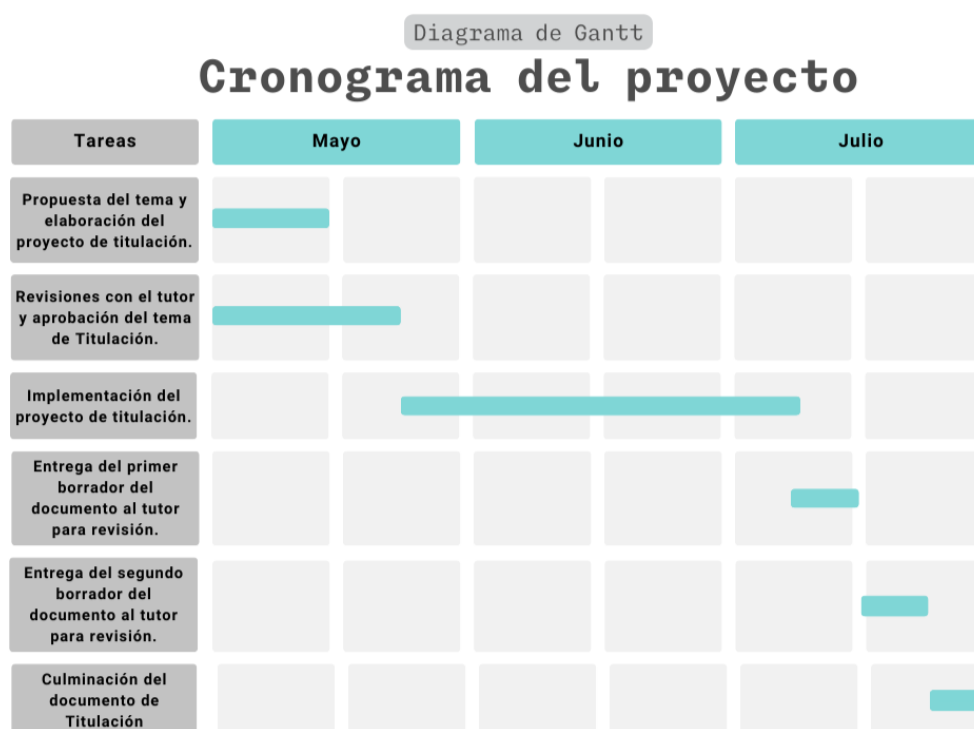


Tabla 5 Diagrama de Gantt del cronograma de actividades para la elaboración del Proyecto de Titulación

PRESUPUESTO

Dado que la implementación del proyecto se llevará a cabo en un módulo de formación en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, el presupuesto incluye los gastos asociados a diversas actividades esenciales. Estos costos comprenden las reuniones de trabajo necesarias para la coordinación y el seguimiento del proyecto, así como los materiales didácticos requeridos para el desarrollo y la enseñanza del proyecto. Además, se incluyen los gastos de impresión para las revisiones y la presentación final del proyecto de titulación. Según los detalles proporcionados en la Tabla 7, el total estimado de estos costos es de \$143,50.

Tabla 6 Estimación de presupuesto para el desarrollo del Proyecto de Titulación

DETALLE		CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
Horas de	ingeniería	50h	\$2.87	\$ 143,50	
TOTAL				\$ 143,50	

CONCLUSIONES

- Se logró identificar con éxito modelos matemáticos que caracterizan la dinámica de la temperatura de la planta didáctica EPC en lazo abierto. El modelo obtenido con un 88.42% de similitud muestra la respuesta del sistema sin retroalimentación.
- El controlador en espacio de estados mostró un buen rendimiento en un rango de temperaturas iniciales de 27°C a 50°C, con tiempos de estabilización rápidos y overshoot mínimos en la mayoría de los casos. Sin embargo, no fue capaz de estabilizarse en escenarios con temperaturas iniciales de 30°C con un setpoint de 25°C y de 50°C con un setpoint de 55°C.
- El controlador PID también presentó un buen rendimiento en un rango de temperaturas iniciales de 28°C a 50°C. Aunque el tiempo de estabilización fue generalmente más largo y el overshoot más alto en comparación con el controlador en espacio de estados, el controlador PID demostró una capacidad superior para manejar cambios bruscos de temperatura, como en el caso de escenarios de 28°C a 50°C. En condiciones de perturbación, el controlador PID mostró una capacidad aceptable para rechazar perturbaciones, aunque con un incremento en el overshoot.
- En la comparativa entre los dos controladores, el controlador en espacio de estados demostró tiempos de estabilización más rápidos y menor overshoot en la mayoría de los escenarios evaluados. Esto sugiere que el controlador en espacio de estados es más eficiente para el seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones en comparación con el controlador PID.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar el controlador en espacio de estados para aplicaciones en las que se requiera una estabilización rápida y precisa de la temperatura, especialmente en rangos de setpoints entre 27°C y 50°C.
- Es importante evitar setpoints que impliquen grandes decrementos o incrementos extremos en la temperatura inicial, ya que el controlador no logra estabilizarse adecuadamente en estos casos.
- El controlador PID es más adecuado para manejar cambios bruscos de temperatura. Se recomienda utilizarlo en escenarios donde se anticipen grandes incrementos o decrementos en la temperatura.
- Para mejorar el rendimiento del controlador PID, se pueden explorar técnicas avanzadas de sintonización de parámetros, así como la implementación de mecanismos de adaptación que permitan ajustar los parámetros en tiempo real según las condiciones del sistema.
- Además, se puede considerar la combinación del controlador PID con técnicas de control predictivo o adaptativo para mejorar su capacidad de rechazo de perturbaciones y reducción de overshoot.
- Se sugiere realizar pruebas adicionales con ambos controladores en diferentes condiciones de operación y con distintos tipos de perturbaciones para validar los resultados obtenidos y asegurar la robustez de los controladores.
- La integración de sensores adicionales y la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real pueden mejorar la capacidad de los controladores para responder a cambios rápidos en las condiciones del sistema.
- Considerando las limitaciones físicas del sistema, se recomienda desarrollar e implementar un sistema de enfriamiento adicional que permita al controlador manejar decrementos significativos en la temperatura de manera más efectiva

REFERENCIAS

- [1] J. Uribe and J. Acevedo, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DIDÁCTICA DE TEMPERATURA,” Medellín, 2016. Accessed: May 16, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/4405/Rep_itm_pre_Acevedo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [2] B. A. Almeida and F. D. Mora, “DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO MULTIVARIABLE PARA EL CONTROL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA PLANTA DIDÁCTICA,” Guayaquil, 2018. Accessed: May 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/46051/1/D-CD108995.pdf>
- [3] E. Casco, “DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PARA LAS PLANTAS DIDÁCTICAS DEL LABORATORIO DE CONTROL Y SISTEMAS,” Quito, 2022. Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23261>
- [4] A. Jaid, G. Durge, A. Joshi, K. Kalambe, H. Dhale, and S. Patankar, “Comparative Study of PID and State Feedback Controller for Level Control System,” in *2023 4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/GCAT59970.2023.10353276.
- [5] Y. Lu, X. Han, L. Lu, X. Feng, and M. Ouyang, “Optimal Charging Strategy for Lithium-Ion Batteries Based on Model Predictive Control with Coupled Thermal-Electric Decomposed Electrode Model,” *IEEE Trans Ind Appl*, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3384470.
- [6] M. Hossain, M. E. Haque, S. Saha, M. T. Arif, and A. M. T. Oo, “State of Charge Estimation of Li-ion Batteries Based on Adaptive Extended Kalman Filter,” in *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9282150.
- [7] K. Pineda, “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE ENTRENAMIENTO PARA CONTROL DE LAZOS ABIERTOS Y CERRADOS UTILIZANDO LABVIEW PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA,” Riobamba, Jul. 2012. Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3063>
- [8] D. A. Macedo Da Silva, A. Da Silva Silveira, and A. C. Do Nascimento, “State Space Predictive Minimum Variance Controller Applied to a Tacho Generator Motor,” in *2022 14th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/SEPOC54972.2022.9976452.
- [9] Carakenio, “Los sistemas de control son sistemas dinámicos.,” *dademuchconnection*, May 2022, [Online]. Available: <https://dademuchconnection.wordpress.com/2016/07/22/los-sistemas-de-control-son->

sistemas-
dinamicos/#:~:text=Los%20sistemas%20de%20control%20son%20sistemas%20din%C3%A1micos

- [10] High Lights, “Manual EPC - Datalights,” Sep. 2017, [Online]. Available: <https://studylib.es/doc/6455058/manual-epc—datalights>
- [11] DataLights, Ecuador. *EPC V3 Stepper*, (May 09, 2016). [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Ny9JJfIoIsE>
- [12] National Instrument, “LabVIEW 2015 Control Design and Simulation Module Readme - National Instruments,” 2015. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375312a.html>
- [13] Emerson, “¿Qué es myDAQ?,” ¿Qué es myDAQ? Accessed: Jul. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/engineering-education/portable-student-devices/mydaq/what-is-mydaq.html>
- [14] S. M. Khot, Nitesh. P. Yelve, and P. Kumar, “Investigation on Performances of Different types of Classical Controllers in Active Vibration Control,” in *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICNTE51185.2021.9487586.
- [15] Omega Byte, “Why LabVIEW?,” Oct. 17, 2022. [Online]. Available: <https://omegabite.hu/en/blog/whylabview>
- [16] S. H. You, S. S. Lee, S. Lim, S.-K. Kim, and C. K. Ahn, “Model-Free Filter for Servo Drive Applications via Error Dynamics Diagonalization Technique,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 71, no. 4, pp. 1901–1909, 2024, doi: 10.1109/TCSI.2024.3352986.
- [17] S. A. Hervé, Y. T. Aurelien, N. N. Leandre, I. J. H. Som, and H. Alphonse, “Design and Experimental Development of Wireless Iterative Learning Fault Estimation Algorithm With Quantization and Packet Losses,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 150120–150127, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123118.
- [18] P. C. Stalin, “EMSOL Automation - Solution Providers of IoT Based Eco Systems,” *Desarrollo de aplicaciones de software de Labview (SCADA)*. [Online]. Available: <http://emsolautomation.com/labview-software-app-dev.php>
- [19] Y. Pan, Z. Guo, X. Li, and H. Yu, “Output-Feedback Adaptive Neural Control of a Compliant Differential SMA Actuator,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 2202–2210, 2017, doi: 10.1109/TCST.2016.2638958.
- [20] J. L. Villa and S. Sanchez, “Implementing a Software-based Controller as a Strategy for Teaching Digital Control,” in *2020 IX International Congress of Mechatronics Engineering and Automation (CIIMA)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/CIIMA50553.2020.9290314.

- [21] H. Singhal, S. Arora, and A. Kaur, "Hands on educational platform for control system models using MATLAB and LabVIEW," in *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2013, pp. 489–494. doi: 10.1109/CCA.2013.6662797.
- [22] L. Valoušek and R. Jalovecky, "Use of the MATLAB® System Identification Toolbox® for the creation of specialized software for parameters identification," in *2021 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICMT52455.2021.9502786.
- [23] MathWorks, "Creating the MATLAB Logo - MATLAB & Simulink Example," Matlab Logo. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/visualize/creating-the-matlab-logo.html>
- [24] Q. Hassan *et al.*, "A comprehensive review of international renewable energy growth," *Energy and Built Environment*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.12.002>.
- [25] G. S. Rivera, N. D. Muñoz Ceballos, and H. M. Vásquez Carvajal, "Methodology for Identification, Modeling and Control of a Robot's Locomotion Motors," in *2020 IX International Congress of Mechatronics Engineering and Automation (CIIMA)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/CIIMA50553.2020.9290301.
- [26] K. Ismail, Suwarno, T. D. Rachmildha, E. Rijanto, and Y. Haroen, "System Identification of a Roller Rig with Factory Default PMSM Drives for Speed Controller Tuning in Speed Synchronized Traction of an Electric Train Simulator," in *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2023, pp. 550–554. doi: 10.1109/ICHVEPS58902.2023.10257502.
- [27] M. S. Sabri, K. Daud, W. S. Saidon, N. H. Ishak, A. A. Abd Samat, and S. S. Mat Isa, "Feed Forward Neural Network Approach for Voltage Transients Identification and Classification," in *2021 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICRAIE52900.2021.9704020.
- [28] L. C. Trindade, P. G. S. Dias, V. F. S. B. Grilo, M. F. Santos, and P. Mercorelli, "Development of a Didactic Graphical Simulation Interface on MATLAB for Systems Control," in *2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCC54292.2022.9805922.
- [29] A. Mengarelli, S. Cardarelli, F. Verdini, L. Burattini, S. Fioretti, and F. Di Nardo, "A MATLAB-based graphical user interface for the identification of muscular activations from surface electromyography signals," in *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2016, pp. 3646–3649. doi: 10.1109/EMBC.2016.7591518.
- [30] C.-Y. Lin, C.-L. Lin, J.-H. Chen, and P.-C. Chang, "Phosphor-Saving SiO₂-Aerogel-Embedded Silicone for Enhancing White LEDs Characteristics," *IEEE*

- Electron Device Letters*, vol. 43, no. 2, pp. 252–255, 2022, doi: 10.1109/LED.2021.3134805.
- [31] D. Zhang *et al.*, “Dominant Mechanism of GaN-Based Single Contact Micro-LED Driven by AC Power,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 44, no. 3, pp. 468–471, 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3237240.
 - [32] Terce, “LED10W-BLANCO,” Terce S.A. [Online]. Available: <https://www.terce.com.ec/es/inicio/385-led10w-blanco.html>
 - [33] A. N. Padmasali, J. Lokesh, and S. G. Kini, “An Experimental Investigation on the Role of LEDs on the Lifetime Performance of Consumer LED Luminaires,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 131765–131771, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3230474.
 - [34] M. Huba, D. Vrancic, and P. Bistak, “Series PID Control With Higher-Order Derivatives for Processes Approximated by IPDT Models,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1109/TASE.2023.3296201.
 - [35] Y. Lin *et al.*, “Determining Temperature-Dependent Optical Characteristics of Remote Phosphor Plates by Transmission-Type Measurement System,” *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 66, no. 3, pp. 1322–1328, 2019, doi: 10.1109/TED.2018.2890193.
 - [36] X. Wang *et al.*, “Monolithic Integration of 1.2kV Optically-Controlled SiC npn Transistor and Antiparallel Diode,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 43, no. 9, pp. 1531–1534, 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3192457.
 - [37] G. Sui, J. Chen, H. Ni, Y. Ma, X. Gao, and N. Wang, “Improvement of LED Performance With an Integrated Thermoelectric Cooling Package,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116535–116543, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004142.
 - [38] P. Sakthi, T. Vishnuram, N. Satheeshkumar, and S. B. Sathishkumar, “IoT-based Real-Time System for Tracking and Monitoring the Health of Soldier,” in *2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, 2023, pp. 531–536. doi: 10.1109/ICEARS56392.2023.10085150.
 - [39] Julpin, “Sensor de temperatura LM35,” Jupin S.A. [Online]. Available: <https://www.julpin.com.co/inicio/sensores/814-sensor-de-temperatura-lm35-original.html>
 - [40] Components 101, “LM35 Temperature Sensor,” 2023. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/lm35-temperature-sensor>
 - [41] WatElectronics, “LM35 Temperature Sensor: Datasheet its working,” Jul. 2023, Houston. [Online]. Available: <https://www.watelectronics.com/lm35-temperature-sensor/>
 - [42] R. R. J, R. Chamanthi, M. P. A, and A. M. J, “VitalLink: NodeMCU IoT Solution for Vital Signs Surveillance,” in *2024 International Conference on Inventive Computation*

- Technologies (ICICT)*, 2024, pp. 1709–1714. doi: 10.1109/ICICT60155.2024.10544455.
- [43] R. Saravanakumar *et al.*, “IoB: Sensors for Wearable Monitoring and Enhancing Health Care Systems,” *IEEE Instrum Meas Mag*, vol. 25, no. 3, pp. 63–70, 2022, doi: 10.1109/MIM.2022.9759352.
- [44] N. Shwetha, L. Niranjana, V. Chidanandan, and N. Sangeetha, “Advance System for Driving Assistance Using Arduino and Proteus Design Tool,” in *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, 2021, pp. 1214–1219. doi: 10.1109/ICICV50876.2021.9388620.
- [45] M. B. R, A. G. S, M. Hadapada, and K. S, “Smart Charging Station for Electric Vehicles Using Solar Power,” in *2023 7th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/CSITSS60515.2023.10334142.
- [46] V. Huilcapi, J. M. Herrero, X. Blasco, and M. Martínez-Iranzo, “Non-linear identification of a Peltier cell model using evolutionary multi-objective optimization**This work was supported by the Ministerio de Economía y Competitividad (Spain) [grant number DPI2015-71443-R] and the Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador) [CB-755-2015],” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 4448–4453, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.372>.
- [47] V. Huilcapi, X. Blasco, J. M. Herrero, and G. Reynoso-Meza, “A Loop Pairing Method for Non-Linear Multivariable Control Systems Under a Multi-Objective Optimization Approach,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 41262–41281, Mar. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976774.
- [48] V. Huilcapi, R. Cajo, V. Ponguillo, and G. Gómez, “Educational Platform for Teaching Automation and Control Engineering: A Pneumatic Levitation System,” in *2023 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/EDUNINE57531.2023.10102909.
- [49] Picuino, “Controlador PID - Control automático - Picuino,” 2024. [Online]. Available: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>
- [50] E. Ghia and C. Rivera, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR EN EL ESPACIO DE ESTADOS PARA EL CONTROL DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA USANDO LABVIEW,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL, Guayaquil, 2024. Accessed: Jul. 29, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27726>
- [51] V. Huilcapi, C. Castillo, D. Sanchez, and R. Cajo, “Optimization of an Air Pressure System: A Multi-Objective Control and Modeling Approach,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 96691–96703, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3426986.

- [52] V. Huilcapi, R. Cajo, J. Orellana, and A. Cascante, “Nonlinear Identification and Position Control of a Pneumatic System,” in *Intelligent Technologies: Design and Applications for Society*, V. Robles-Bykbaev, J. Mula, and G. Reynoso-Meza, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 127–138.
- [53] GitHub, “Modelado en espacio de estados — Diseño y Ajuste de Sistemas de Control,” 2024. [Online]. Available: https://gonmolina.github.io/CCyVE_book/sources/notebooks_sources/modulo1/espacio_estado/modelado_ss.html
- [54] K. Ogata, Enrique. Pinto Bermúdez, and Fernando. Matía Espada, *Ingeniería de control moderna*, Person Educación S.A., vol. 904. Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [55] O. Andrs and M. Maliszewski, “Optimization of The DC Motor State Space Controller for FPGA,” in *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2018, pp. 1–7.
- [56] V. Ignatenko, A. Yudintsev, and D. Lyapunov, “Application of State-Space Method for Control System Analysis,” in *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729658.
- [57] F. Ruelens, B. J. Claessens, S. Quaiyum, B. De Schutter, R. Babuška, and R. Belmans, “Reinforcement Learning Applied to an Electric Water Heater: From Theory to Practice,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3792–3800, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2640184.
- [58] B. J. Claessens, P. Vrancx, and F. Ruelens, “Convolutional Neural Networks for Automatic State-Time Feature Extraction in Reinforcement Learning Applied to Residential Load Control,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3259–3269, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2629450.
- [59] Y. Ma, Z. Mi, R. Zhang, H. Peng, and Y. Jia, “Hybrid Control Strategy for Air-conditioning Loads Participating in Peak Load Reduction Through Wide-range Transport Model,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 6, pp. 1542–1551, 2022, doi: 10.35833/MPCE.2021.000108.
- [60] S. Park *et al.*, “A Deep Reinforcement Learning Framework for Fast Charging of Li-Ion Batteries,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 2770–2784, 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3140316.
- [61] A. Jaid, G. Durge, A. Joshi, K. Kalambe, H. Dhale, and S. Patankar, “Comparative Study of PID and State Feedback Controller for Level Control System,” in *2023 4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/GCAT59970.2023.10353276.
- [62] U. Wibawa, E. Mardiana, and L. Ardhenta, “Design and Performance Analysis of PID Controller for Extended Output Voltage Buck-Boost Converter,” in *2020 10th Electrical*

- Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, 2020, pp. 31–36. doi: 10.1109/EECCIS49483.2020.9263458.
- [63] B. Cesar and Castañeda Julio, “Control y optimización de un servosistema traslacional-rotacional por ubicación de polos,” Universidad Nacional del Callao, Bellavista, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12952/7212>
 - [64] Mazzone Virginia, “Estructuras Prácticas de Control SISO,” Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, 2022.
 - [65] H. Singhal, S. Arora, and A. Kaur, “Hands on educational platform for control system models using MATLAB and LabVIEW,” in *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2013, pp. 489–494. doi: 10.1109/CCA.2013.6662797.
 - [66] X. Ma, A. Ghosh, E. Cuce, and S. Saboor, “Building integrated photovoltaic-thermal systems (BIPVT) and spectral splitting technology: A critical review,” *Next Sustainability*, vol. 4, p. 100056, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100056>.

ANEXOS

Código central del Proyecto en Matlab:

```
%%Proyecto de titulación Mario Chauca - Brian Soto

close all
clear all
clc

%% Leer datos
[num, txt, raw] = xlsread("DataEE_35_40.xlsx");
[numf, txtf, rawf] = xlsread("DataPID_35_40.xlsx");

%% Definir la variable
variable = 40;

%% Crear figura
figure

% Graficar datos
plot(num(:,1), num(:,3), 'LineWidth', 1.5) %Step
hold on
plot(num(:,1), num(:,2), 'LineWidth', 2) %Espacio estados
plot(numf(:,1), numf(:,2), 'LineWidth', 2) %PID

% Graficar líneas adicionales
y1 = variable * 1.02; % Línea para límite superior de estabilidad
y2 = variable * 0.98; % Línea para límite inferior de estabilidad
x_range = [min(num(:,1)); max(num(:,1))]; % Rango del eje X basado en los
datos

plot(x_range, [y1; y1], 'k--', 'LineWidth', 1.5) % Línea negra discontinua
para y = variable * 1.02
plot(x_range, [y2; y2], 'k--.', 'LineWidth', 1.5) % Línea negra punteada para
y = variable * 0.98

hold off

% Añadir etiquetas y leyenda en LaTeX
xlabel('$Time~(s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$Temperature~(^{\circ}C)$', 'Interpreter', 'latex')
legend({'$Step$', '$State~Space$', '$PID$'}, ...
       'Interpreter', 'latex', 'Location', 'best', 'FontSize', 14)

grid on
xlim([0 135])
ylim([34 42])
```

Guayaquil, 12 de agosto del 2024

Ing. Orlando Barcia, Msc.
Director de Carrera de Electrónica y Automatización.
De mis consideraciones:

Yo, Victor Huilcapi Subía, portador de la cédula de ciudadanía No. 0917206294 tutor de trabajo de titulación **“Diseño e implementación de un Controlador en el Espacio de Estados para el control de temperatura en una planta didáctica (EPC) usando Labview”**, informo la calificación al Trabajo de Titulación de los estudiantes de la Malla Ajuste: BRIAN ROLANDO SOTO NOBOA y MARIO VLADIMIR CHAUCA ARÉVALO

Criterio	Descripción del criterio	Puntaje	Observaciones
Identificación y planteamiento del problema de investigación	Se muestra la importancia del problema y la contribución que se quiere alcanzar con el Proyecto técnico.	15	
Revisión del marco teórico y de las referencias bibliográficas	Este criterio establece la relación entre la revisión literaria y el problema a abordar en el Proyecto técnico, así como el adecuado nivel de exhaustividad en la revisión de las fuentes de información.	15	
Revisión del marco metodológico	Se establecen con claridad y de manera estructurada las distintas fases, uso de métodos, herramientas, diseños, recursos, materiales, etc, para el desarrollo del Proyecto técnico y la propuesta de solución.	20	
Revisión de la Funcionalidad del proyecto	Permite evaluar el nivel de funcionalidad del trabajo desarrollado, tomando en cuenta los objetivos del mismo.	30	
Revisión y análisis de los resultados obtenidos	Se expresan o presentan los resultados alcanzados en el desarrollo del proyecto técnico y cómo se relacionan con el cumplimiento de los objetivos, el impacto y la innovación.	15	
Revisión de las conclusiones y Recomendaciones	Este criterio establece la claridad con que el autor expone su posición y sus ideas respecto a las conclusiones y recomendaciones expresadas.	5	
PUNTAJE FINAL:		100	

Por la atención que se sirva dar a la presente, quedo de usted muy agradecido.

Atentamente,



Ph.D. Victor Huilcapi S.

Docente Tutor.

SEDE GUAYAQUIL

Chambers # 227 y 5 de Junio • Campus Centenario • Casilla 09-01-47-52 • Teléfono: (593) 4 2590-630 Ext.: 4401