

**DESARROLLO DE UN MODELO DE CONTROL DE TEMPERATURA QUE  
PERMITA LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y LA INTEGRACIÓN CON SIMULINK**

**STIVEN ALEXANDER HERNÁNDEZ MONSALVE  
JUAN CAMILO VELÁSQUEZ VÉLEZ  
CRISTIAN CAMILO VÉLEZ GALLEGO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN  
2025**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE CONTROL DE TEMPERATURA QUE  
PERMITA LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y LA INTEGRACIÓN CON SIMULINK**

**STIVEN ALEXANDER HERNÁNDEZ MONSALVE**

**JUAN CAMILO VELÁSQUEZ VÉLEZ**

**CRISTIAN CAMILO VÉLEZ GALLEGO**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista**

**Asesores**

**Karen Lemmel Vélez**

**Magister en Automatización y Control Industrial**

**Arley Fernando Villa Salazar**

**Magister en Ingeniería**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

## Contenido

	<b>Pag.</b>
1 Planteamiento del problema .....	16
1.1 Descripción.....	16
1.2 Formulación .....	16
2 Justificación.....	17
3 Objetivos .....	18
3.1 General .....	18
3.2 Específicos: .....	18
4 Referentes teóricos .....	19
4.1 Validación de modelos mediante simulación.....	19
4.1.1 Técnicas de validación de modelos.....	20
4.1.2 Validación cruzada (Cross-validation).....	20
4.1.3 Verificación y validación (V&V) en simulación. ....	20
4.2 Sistema Dinámico .....	21
4.2.1 Ecuaciones Diferenciales en Sistemas Dinámicos.....	21
4.2.2 Función de Transferencia.....	22
4.2.3 Representación en Espacio de Estados.....	22
4.3 Diagramas de Bloques.....	24
4.3.1 Representación Matemática en Diagramas de Bloque.....	25
4.3.2 Realimentación en Diagramas de Bloques.....	25
4.4 Simulación de Sistemas Dinámicos .....	26
4.4.1 Ahorro de recursos. ....	26
4.4.2 Exploración de diseños.....	26
4.4.3 Optimización del desarrollo. ....	26
4.5 MATLAB y Simulink: Fundamentos y Aplicaciones.....	27

4.6	Simulink .....	28
4.7	Modelado de Sistemas Térmicos.....	29
4.7.1	Principios del Modelado de Sistemas Térmicos. ....	29
4.7.2	Función de Transferencia en Sistemas Térmicos.....	30
4.7.3	Representación en Espacio de Estados.....	30
4.7.4	Ejemplo de Modelado de un Sistema Térmico. ....	30
4.7.5	Aplicaciones del Modelado de Sistemas Térmicos.....	31
4.8	Análisis de Sistemas Dinámicos: Primer, Segundo y Orden Superior.....	32
4.8.1	Sistemas de Primer Orden.....	32
4.8.2	Sistemas de Segundo Orden.....	33
4.8.3	Sistemas de Orden Superior.....	34
4.9	Control de Sistemas de Temperatura en Electrónica de Potencia.....	35
4.10	Tipos de Sensores y su Aplicación en el Control de Sistemas Térmicos.....	38
4.10.1	Principios de Medición de Temperatura. ....	39
4.10.2	Tipos de Sensores de Temperatura y sus Aplicaciones.....	39
4.10.3	Factores que Afectan la Precisión de la Medición. ....	40
4.10.4	Factores que Afectan la Precisión de la Medición .....	41
4.11	Ingeniería basada en modelos (Model-Based Design - MBD) .....	42
4.11.1	Modelado y simulación de sistemas complejos. ....	43
4.11.2	Desarrollo iterativo y validación en el ciclo de diseño. ....	43
4.11.3	Generación automática de código. ....	43
4.12	Open Science y compartición de recursos experimentales .....	44
4.12.1	Repositorios de datos abiertos y reproducibilidad científica. ....	44
4.12.2	Licenciamiento y propiedad intelectual en ciencia abierta. ....	44
4.12.3	Colaboración interdisciplinaria y acceso global.....	44

4.13	Métodos Didácticos en Ingeniería Electrónica.....	45
4.14	Controladores PID.....	46
5	Metodología .....	48
5.1	Tipo de proyecto.....	48
5.2	Método .....	49
5.3	Instrumentos de recolección de información. ....	51
5.3.1	Fuentes primarias. ....	51
5.3.2	Fuentes secundarias.....	51
6	Resultados .....	53
6.1	Simular el modelo de control térmico en Simulink.....	53
6.1.1	Primera interacción Simulink.....	53
6.1.2	Descarga e Instalación de Matlab.....	53
6.1.3	Descarga de Librerías en Simulink. ....	53
6.1.4	Prueba Inicial: Control de un LED con Arduino.....	53
6.1.5	Prueba número dos:.....	54
6.1.6	Prueba número 3: .....	55
6.1.7	prueba número 4:.....	57
6.1.8	Prueba número 5: .....	60
6.2	Análisis comparativo entre simulaciones digitales y experimentación física. ....	64
6.3	Construir una maleta didáctica con los componentes necesarios para el control.....	65
7	Conclusiones .....	73
8	Recomendaciones.....	75
9	Referencias .....	77
10	Anexos.....	80

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Modelado de simulación básica.....	19
<i>Figura 2.</i> Diagrama de bloques. ....	25
<i>Figura 3.</i> Ejemplo de diagrama de Bode.....	36
<i>Figura 4.</i> Ejemplo de diagrama de Nyquist. ....	36
<i>Figura 5.</i> Verificación y validación. ....	43
<i>Figura 6.</i> Led encendido mediante pulsante. ....	54
<i>Figura 7.</i> Prueba de señal analógica.....	55
<i>Figura 8.</i> Variación de intensidad del led según ajuste potenciómetro.....	56
<i>Figura 9.</i> Variación de ondas de potenciómetro (amarilla) y PWM (morada). ....	57
<i>Figura 10.</i> Montaje de control on/off de temperatura con Simulink y Arduino. ....	57
<i>Figura 11.</i> Resistencias conectadas en paralelo con sensor de temperatura. ....	58
<i>Figura 12.</i> Diseño de adquisición de datos desde Arduino.....	58
<i>Figura 13.</i> Voltaje cuando la temperatura es inferior a la establecida y cuando la supera. ....	59
<i>Figura 14.</i> Visualización en Simulink de control on/off.....	59
<i>Figura 15.</i> Simulación digital sistema de control térmico 1. ....	61
<i>Figura 16.</i> Simulación digital sistema de control térmico 2. ....	62
<i>Figura 17.</i> Simulación digital sistema de control térmico 3. ....	62
<i>Figura 18.</i> Maleta de aluminio de 4 compartimientos construido en aluminio-plástico.....	66
<i>Figura 19.</i> Mini Pc MaxMini B1 utilizado para el control de las prácticas. ....	66
<i>Figura 20.</i> PC Monitor de 10.1 pulgadas utilizado como interfaz de prácticas. ....	67
<i>Figura 21.</i> Arduino mega 2560 R3 utilizado para las pruebas.....	67
<i>Figura 22.</i> Sensor LM35 para la medición de temperatura.....	68
<i>Figura 23.</i> Termómetro Digital.....	68
<i>Figura 24.</i> Tarjeta MOSFET IRF520 para manejar la potencia del actuador.....	69
<i>Figura 25.</i> Cable USB Tipo B para Arduino de 50 cm. ....	69
<i>Figura 26.</i> Cable conexión fácil Dupont de 30 cm. ....	70
<i>Figura 27.</i> Conector 250vac 15A, con suiche para panel. ....	70
<i>Figura 28.</i> Protoboard que se monta en el módulo de experimentación.....	71
<i>Figura 29.</i> Celda Peltier TEC1-12706. ....	71

*Figura 30.* Distribución de elementos en el maletín. ....72

**Lista de ecuaciones**

<i>Ecuación (1)</i> .....	21
<i>Ecuación (2)</i> .....	22
<i>Ecuación (3)</i> .....	22
<i>Ecuación (4)</i> .....	22
<i>Ecuación (5)</i> .....	23
<i>Ecuación (6)</i> .....	23
<i>Ecuación (7)</i> .....	24
<i>Ecuación (8)</i> .....	29
<i>Ecuación (9)</i> .....	29
<i>Ecuación 10</i> .....	30
<i>Ecuación (11)</i> .....	30
<i>Ecuación (12)</i> .....	31
<i>Ecuación (13)</i> .....	32
<i>Ecuación (14)</i> .....	33
<i>Ecuación (15)</i> .....	33
<i>Ecuación (16)</i> .....	34
<i>Ecuación (17)</i> .....	34

**Lista de anexos**

**Pág.**

Anexo 1 *Ecuaciones* .....80

## Resumen

### **DESARROLLO DE UN MODELO DE CONTROL DE TEMPERATURA QUE PERMITA LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y LA INTEGRACIÓN CON SIMULINK**

**STIVEN ALEXANDER HERNANDEZ MONSALVE**

**JUAN CAMILO VELÁSQUEZ VÉLEZ**

**CRISTIAN CAMILO VÉLEZ GALLEGO**

Este proyecto describe el desarrollo de un módulo didáctico para el control de temperatura, integrando simulación en Simulink con la implementación física mediante Arduino. El objetivo principal fue facilitar la comprensión de los sistemas de control térmico a través de una experiencia práctica, que permitiera comparar directamente el comportamiento de un modelo simulado con el de una planta real.

Se construyó un prototipo portátil que incluye sensores, actuadores y elementos de visualización, con el cual se realizaron diferentes pruebas de control binario y proporcional utilizando señales analógicas. A partir de estas pruebas se recogieron datos, se ajustaron parámetros del modelo y se validó el funcionamiento del sistema tanto en entorno digital como en condiciones reales.

El trabajo demostró que la integración entre simulación y práctica fortalece el proceso de aprendizaje en control automático, al permitir a los estudiantes interactuar directamente con las variables del sistema y analizar su respuesta ante diferentes escenarios.

*Palabras claves:* Voltaje, Corriente, Control de temperatura, Simulink, Arduino, Sistema térmico, Control on/off, Automatización, Adquisición de datos, Controlador PID

## **Abstract**

### **DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE CONTROL MODEL FOR DATA ACQUISITION AND INTEGRATION WITH SIMULINK**

**STIVEN ALEXANDER HERNANDEZ MONSALVE**

**JUAN CAMILO VELÁSQUEZ VÉLEZ**

**CRISTIAN CAMILO VÉLEZ GALLEGO**

This project presents the development of a didactic module for temperature control, integrating Simulink simulation with physical implementation using Arduino. The main goal was to support the understanding of thermal control systems through a hands-on approach, allowing direct comparison between a simulated model and a real experimental setup.

A portable prototype was built, including sensors, actuators, and display elements, which was used to carry out several tests involving binary and proportional control with analog signals. Data was collected during the experiments, model parameters were adjusted, and the system's performance was validated in both digital and physical environments.

The results showed that combining simulation with real-world practice enhances the learning process in automatic control, enabling students to interact directly with system variables and analyze their response under different conditions.

*Keywords:* Voltage, current, Temperature control, Simulink, Arduino, Thermal system, On/off control, Automation, Data acquisition, PID controller

## Glosario

**Análisis de Estabilidad:** Evaluación del comportamiento de un sistema para determinar si sus respuestas se mantienen dentro de límites controlados o divergen con el tiempo (Dorf, 2021).

**Ciencia Abierta (Open Science):** Enfoque colaborativo en la investigación científica que busca compartir datos, publicaciones y metodologías de manera transparente y accesible (Ogata, 2010).

**Coefficiente de Amortiguamiento ( $\zeta$ ):** Parámetro que define la cantidad de disipación de energía en un sistema de segundo orden, influyendo en su estabilidad y respuesta transitoria (Nice, 2011).

**Control de Temperatura:** Técnica utilizada para regular la temperatura de un sistema mediante sensores y controladores, asegurando que se mantenga dentro de un rango deseado. Es fundamental en procesos térmicos como el control de una celda peltier incandescente (Nice, 2011).

**Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo):** Algoritmo de control que ajusta la salida de un sistema basado en tres términos: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Se utiliza en sistemas térmicos para mantener la estabilidad de la temperatura (Nice, 2011).

**Error Cuadrático Medio (MSE):** Métrica utilizada en la validación de modelos para medir la diferencia promedio entre los valores simulados y los valores reales de un sistema (Dorf, 2021).

**Espacio de Estados:** Representación matemática de un sistema dinámico mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, usando matrices para describir la evolución de las variables de estado (Dorf, 2021).

**Frecuencia Natural ( $\omega_n$ ):** Valor característico de un sistema de segundo orden que determina la rapidez de respuesta ante una perturbación sin considerar efectos de amortiguamiento (Dorf, 2021).

**Función de Transferencia:** Expresión matemática que relaciona la salida y la entrada de un sistema en el dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace. Se usa para analizar la estabilidad y respuesta del sistema (Nice, 2011).

**Generación Automática de Código:** Proceso en el que un modelo de simulación genera directamente código ejecutable para un sistema embebido, reduciendo errores manuales y acelerando la implementación (Dorf, 2021).

**Método de Lugar de las Raíces:** Técnica gráfica utilizada en el análisis de control para estudiar la variación de los polos de la función de transferencia al modificar un parámetro del sistema (Nice, 2011).

**Modelo Matemático:** Estructura basada en ecuaciones que describe el comportamiento de un sistema físico o lógico. Puede representarse mediante ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia o modelos de espacio de estado (Dorf, 2021).

**Modulación por Ancho de Pulso (PWM):** Técnica utilizada en electrónica y control para regular la potencia entregada a un dispositivo variando el ciclo de trabajo de una señal de encendido y apagado (Ogata, 2010).

**Relé de Estado Sólido (SSR):** Dispositivo electrónico que permite controlar cargas eléctricas sin partes mecánicas, mejorando la durabilidad y velocidad de respuesta en sistemas de conmutación (Dorf, 2021).

**Respuesta Transitoria:** Comportamiento de un sistema dinámico desde el momento en que recibe una perturbación hasta que alcanza su estado estable. Se analiza con herramientas como la función de transferencia (Ogata, 2010).

**Sensor de Temperatura TMP36:** Dispositivo que mide la temperatura en grados Celsius y proporciona una salida analógica proporcional al valor detectado. Es ampliamente utilizado en sistemas de control térmico (Nice, 2011).

**Simulación:** Proceso de modelado de un sistema real en un entorno virtual para analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones sin necesidad de construir un prototipo físico (Ogata, 2010).

**Sistema Dinámico:** Un sistema cuya salida depende no solo de las entradas actuales, sino también de su historial de estados. Se puede modelar mediante ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia o representaciones en espacio de estados (Ogata, 2010).

**Transformada de Laplace:** Herramienta matemática utilizada en sistemas de control para convertir ecuaciones diferenciales en expresiones algebraicas, facilitando su análisis en el dominio de la frecuencia (Ogata, 2010).

**Validación Cruzada (Cross-Validation):** Método estadístico utilizado para evaluar la precisión de un modelo dividiendo los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, evitando sobreajuste (Nice, 2011).

## Introducción

El presente documento aborda el diseño, desarrollo y validación de un sistema de control térmico mediante la integración de hardware y software, con el fin de implementar estrategias de automatización orientadas a la regulación de temperatura. El enfoque se centra en la adquisición de datos a través de sensores térmicos, su procesamiento mediante microcontroladores, y la simulación del comportamiento del sistema en un entorno digital especializado como MATLAB-Simulink.

A lo largo del documento, se presentan los fundamentos teóricos del control automático, se describen los componentes electrónicos y lógicos empleados, y se analizan los resultados obtenidos tanto en entornos físicos como digitales. El estudio incluye la caracterización de la respuesta térmica del sistema, la implementación de controladores tipo ON/OFF y PID, así como la comparación entre las mediciones reales y las simulaciones, con el propósito de establecer relaciones entre el comportamiento esperado y el observado.

Los resultados han sido organizados en distintas categorías que permiten comprender la evolución del sistema: en primer lugar, se presentan las pruebas de adquisición de temperatura y control con hardware; posteriormente, se expone el modelado y simulación del sistema térmico; y finalmente, se realiza una comparación crítica entre los datos reales y los simulados. Este orden responde a una lógica de progresión técnica y analítica, que facilita la comprensión del proceso y de los hallazgos obtenidos. Así, el documento ofrece una visión integral del desarrollo y evaluación de un sistema de control térmico, combinando la práctica experimental con el respaldo de herramientas de simulación.

## **1 Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción**

El control automático es una de las áreas fundamentales en la ingeniería eléctrica, pero su enseñanza enfrenta desafíos debido a la naturaleza abstracta y compleja de los sistemas dinámicos. La falta de herramientas pedagógicas que permitan a los estudiantes experimentar en tiempo real con modelos y sistemas físicos limita su capacidad para comprender y aplicar conceptos esenciales como el control proporcional (P), el control proporcional-integral (PI) y la respuesta de sistemas de primer orden (Ogata, 2010). Esta limitación se evidencia en la dificultad de los estudiantes para realizar una transición efectiva entre el modelado teórico y la implementación práctica de sistemas de control, lo cual es crucial para su desempeño en entornos industriales y de investigación (Nice, 2011)

Se propone un proyecto que integre simulaciones en Simulink con un prototipo experimental que permita a los estudiantes interactuar de forma directa con el sistema de control térmico de una celda peltier. Esta propuesta tiene como objetivos específicos desarrollar una simulación en Simulink que permita analizar la respuesta del sistema térmico en diversas condiciones, construir una maleta didáctica que contenga todos los componentes necesarios para el control físico de temperatura, y realizar una validación comparativa entre los datos simulados y los obtenidos experimentalmente. Este enfoque permitirá a los estudiantes observar y manipular un sistema de control completo, desde su modelado hasta su implementación práctica, proporcionando una experiencia educativa integral.

### **1.2 Formulación**

¿Cómo implementar un sistema de control binario para regular la temperatura de una celda peltier utilizando Arduino, y qué estrategias de control pueden aplicarse para reducir las oscilaciones térmicas del sistema?

## 2 Justificación

La realización de este proyecto de desarrollo experimental responde a la necesidad de fortalecer las competencias prácticas en el área de control automático dentro del programa de Ingeniería Eléctrica de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Tradicionalmente, la enseñanza de sistemas de control térmico se ha centrado en el abordaje teórico de conceptos como la función de transferencia, el análisis en espacio de estados y el diseño de controladores. Sin embargo, la transición efectiva de estos conceptos al contexto experimental presenta grandes desafíos para los estudiantes, especialmente cuando no se cuenta con herramientas que permitan simular y validar en tiempo real las respuestas de sistemas físicos. Este proyecto busca cerrar esa brecha mediante el diseño de un módulo didáctico que articule la simulación en Simulink con la implementación física de un sistema de control térmico binario basado en Arduino.

La propuesta se justifica en tanto ofrece una solución tangible, replicable y pedagógicamente efectiva, al integrar en una misma plataforma el modelado computacional, la adquisición de datos, y el análisis comparativo entre simulación y experimentación real. La construcción de una maleta didáctica equipada con sensores, actuadores y elementos de control permite que estudiantes y docentes interactúen directamente con el sistema, comprendiendo de manera práctica fenómenos como la respuesta transitoria, la oscilación térmica, y la dinámica de sistemas on/off. Esto no solo promueve el aprendizaje activo, sino que también fomenta el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la transferencia de conocimientos hacia aplicaciones reales.

Este proyecto tiene un impacto a largo plazo en el ecosistema educativo de la institución, ya que el módulo experimental quedará documentado, sistematizado y disponible para ser incorporado en cursos, laboratorios o semilleros de investigación. Su utilización puede extenderse a otras áreas de automatización e instrumentación, convirtiéndose en un recurso versátil que contribuye al mejoramiento continuo de las prácticas formativas. En definitiva, el proyecto no solo mejora la calidad del aprendizaje en control automático, sino que también fortalece la capacidad institucional para innovar en procesos de enseñanza-aprendizaje aplicados a la ingeniería.

### 3 Objetivos

#### 3.1 General

Desarrollar un módulo de control de temperatura mediante adquisición de datos y simulación en Simulink, que permita comparar el comportamiento del modelo simulado con el de una planta física experimental, destinada a las prácticas de control automático en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la I.U. Pascual Bravo.

#### 3.2 Específicos:

Simular el modelo de control térmico en Simulink, evaluando su comportamiento ante diferentes condiciones operativas, con el fin de validar su respuesta y generar datos que respalden el diseño del prototipo físico.

Construir una maleta didáctica que integre los componentes requeridos para el control térmico de una celda peltier, con el propósito de facilitar la experimentación práctica del sistema de control por parte de estudiantes y docentes.

Corroborar la validez del modelo de control térmico a través de la comparación entre los resultados obtenidos en Simulink y los datos experimentales del prototipo físico, con el fin de validar el módulo didáctico acompañado de guías de uso y ejercicios prácticos.

## 4 Referentes teóricos

### 4.1 Validación de modelos mediante simulación.

La verificación y validación de modelos de simulación son procesos esenciales para asegurar la precisión y credibilidad de los modelos desarrollados. Dado que estos modelos constituyen aproximaciones del comportamiento de sistemas reales, nunca los replican con exactitud, lo que hace imprescindible la aplicación de metodologías que garanticen su confiabilidad y adecuación para los objetivos planteados. En la Figura 1, se representa visualmente la estructura fundamental de un modelo de simulación, ilustrando las fases clave en su desarrollo y análisis (Dorf, 2016).

La verificación de un modelo tiene como propósito comprobar que su implementación se ajusta fielmente a las especificaciones conceptuales y los supuestos iniciales. Este proceso permite la detección y corrección de errores de codificación o diseño que puedan comprometer su desempeño. De acuerdo con Ogata (2010), el principal objetivo de la verificación es garantizar que la estructura del modelo y sus componentes operen de acuerdo con los parámetros previamente establecidos. Al tratarse de un proceso iterativo, la verificación se lleva a cabo en paralelo con el desarrollo del modelo, utilizando herramientas que aseguren la coherencia entre el modelo conceptual y el implementado (Nice, 2011).

BASIC SIMULATION MODELING

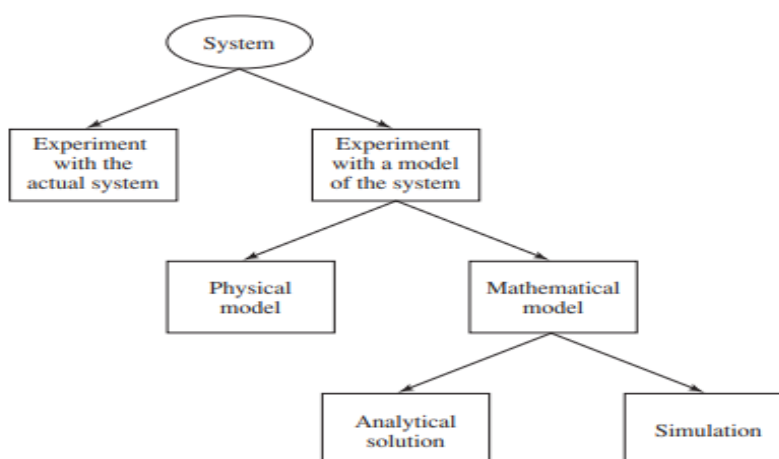


Figura 1. Modelado de simulación básica.

Fuente. Nice, 2011

#### **4.1.1 Técnicas de validación de modelos.**

Existen diversas estrategias estadísticas diseñadas para comparar los resultados de un modelo con datos reales, garantizando su precisión. Entre las más comunes se encuentran el análisis de sensibilidad, que evalúa cómo los cambios en las variables de entrada afectan los resultados; las pruebas de hipótesis, que verifican la significancia de los parámetros del modelo; y el cálculo del error cuadrático medio (MSE), que mide la discrepancia promedio entre los valores simulados y los observados (Law, 2007).

#### **4.1.2 Validación cruzada (Cross-validation).**

Este método divide los datos disponibles en conjuntos separados para entrenamiento y validación. Su objetivo principal es prevenir el sobreajuste del modelo a un conjunto específico de datos, asegurando así su capacidad para realizar predicciones precisas en datos no vistos y mejorar su desempeño general (Law, 2007)

#### **4.1.3 Verificación y validación (V&V) en simulación.**

Este proceso consta de dos etapas complementarias. La verificación se enfoca en garantizar que el modelo ha sido implementado sin errores, asegurando que el código y la estructura estén libres de fallos. Por otro lado, la validación busca confirmar que el modelo refleja con precisión el comportamiento del sistema real, evaluando su utilidad y representatividad para el propósito específico (Law, 2007).

## 4.2 Sistema Dinámico

Un sistema dinámico es aquel en el que la salida no solo depende de las condiciones actuales, sino también del historial de estados anteriores. Es decir, se trata de un sistema en el que las variables evolucionan a lo largo del tiempo siguiendo una ecuación matemática que describe su comportamiento (Ogata, 2010).

Estos sistemas pueden clasificarse en dos tipos principales:

Sistemas de tiempo continuo, donde las variables cambian de manera constante con el tiempo.

Sistemas de tiempo discreto, en los que las variables se actualizan en instantes específicos.

Algunos ejemplos de sistemas dinámicos incluyen circuitos eléctricos, sistemas mecánicos, procesos térmicos (como el control de temperatura en una celda peltier) y sistemas de control en general. Para analizar su comportamiento, estos sistemas pueden modelarse utilizando ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia o representaciones en el espacio de estados (Nice, 2011).

### 4.2.1 Ecuaciones Diferenciales en Sistemas Dinámicos.

Los sistemas dinámicos se describen mediante ecuaciones diferenciales, ya que modelan la relación entre la entrada y la salida del sistema en función del tiempo. Según Ogata (2010), la ecuación diferencial general de un sistema lineal de orden  $n$  como se muestra en la Ecuación (1) es:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \quad \text{Ecuación (1)}$$

$y(t)$  es la salida del sistema.

$u(t)$  es la entrada.

$a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  son coeficientes del sistema.

$b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$  son coeficientes de la entrada.

Las ecuaciones diferenciales pueden resolverse mediante la transformada de Laplace para obtener una representación más manejable en el dominio de la frecuencia (Nice, 2011).

#### 4.2.2 Función de Transferencia.

La función de transferencia, también conocida como Ecuación (2), es una herramienta matemática que describe la relación entre la entrada y la salida de un sistema en el dominio de la frecuencia. Se define aplicando la transformada de Laplace a la ecuación diferencial del sistema, considerando condiciones iniciales nulas (Nice, 2011)

$$G_S = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Ejemplo de un sistema de **primer orden** como se muestra en la Ecuación (3) (Ogata, 2010)

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Ejemplo de un sistema de **segundo orden** como se muestra en Ecuación (4) (Dorf, 2021)

$$G(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2(\zeta w_n s + w_n^2)} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

K es la ganancia del sistema.

$\tau$  es la constante de tiempo.

$\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema.

$\zeta$  es el coeficiente de amortiguamiento

La función de transferencia sirve al diseño y análisis de sistemas de control, para determinar la estabilidad, la respuesta en frecuencia y el comportamiento general del sistema (Dorf, 2021)

#### 4.2.3 Representación en Espacio de Estados.

La representación en espacio de estados es una alternativa a la función de transferencia para describir sistemas dinámicos, especialmente en el análisis de sistemas multivariados o de orden

superior (Ogata, 2010) se define mediante ecuaciones diferenciales de primer orden como se muestra en la Ecuación (5) y Ecuación (6):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

$x(t)$  es el vector de estado del sistema.

$u(t)$  es la entrada

$y(t)$  es la salida.

A es la matriz de estados.

B es la matriz de entrada.

C es la matriz de salida.

D es la matriz de transmisión directa

### 4.3 Diagramas de Bloques

Los diagramas de bloques son herramientas fundamentales en la representación de sistemas dinámicos, ya que permiten modelar su comportamiento mediante funciones de transferencia y ecuaciones diferenciales. Cada bloque dentro del diagrama encapsula una función matemática específica que describe la relación entre la entrada y la salida del sistema. Esta representación gráfica simplifica el análisis del sistema y facilita la aplicación de metodologías como el lugar de las raíces y el análisis de respuesta en frecuencia, esenciales en el diseño y ajuste de controladores. En la Figura 2, se ilustra claramente la estructura de un sistema modelado mediante esta técnica, lo que permite visualizar de manera ordenada las interacciones entre los distintos componentes del sistema (Ogata, 2010).

En un diagrama de bloques típico, se pueden identificar los siguientes elementos:

Entrada  $U(s)$ : Representa la señal o estímulo aplicado al sistema

Bloques funcionales: Cada bloque contiene una función de transferencia que define la relación entre su entrada y salida.

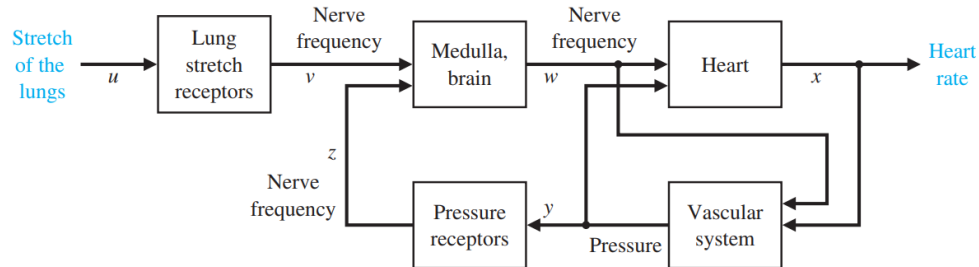
Sumadores: Se utilizan para combinar señales, representados por un círculo con signos + y -  
 $Y(s)$ ): Resultado del procesamiento del sistema.

líneas de conexión: Indican el flujo de señal entre los bloques. Salida.

En la Ecuación (7), Es un ejemplo de sistema con función de transferencia como se puede evidenciar:

$$G(s) = \frac{1}{Ts+1} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Los diagramas de bloques permiten visualizar cómo se estructuran los sistemas de control y facilitan su análisis en términos de estabilidad, respuesta transitoria y optimización (Ogata, 2010).



*Figura 2.* Diagrama de bloques.  
Fuente. Dorf, 2021.

#### 4.3.1 Representación Matemática en Diagramas de Bloque.

Los diagramas de bloques se utilizan para representar sistemas dinámicos mediante funciones de transferencia y ecuaciones diferenciales. Cada bloque en el diagrama contiene una función matemática que describe cómo la entrada se transforma en salida. La conversión de un sistema físico a un diagrama de bloques facilita su análisis y permite aplicar técnicas de control como el lugar de las raíces y la respuesta en frecuencia (Ogata, 2010).

#### 4.3.2 Realimentación en Diagramas de Bloques.

Un aspecto clave en los diagramas de bloques es la realimentación, que consiste en tomar una porción de la salida del sistema y compararla con la entrada para ajustar el comportamiento del sistema. Este mecanismo se representa con una trayectoria de retroalimentación negativa o positiva. Los sistemas en lazo cerrado, que incorporan realimentación, mejoran la estabilidad y el rechazo a perturbaciones (Dorf, Modern Control Systems, 2021)

## **4.4 Simulación de Sistemas Dinámicos**

La simulación de sistemas dinámicos consiste en la creación de modelos matemáticos que representan sistemas cuyo comportamiento varía a lo largo del tiempo. Estos sistemas se describen mediante un conjunto de variables que determinan su estado en cada momento y un conjunto de reglas deterministas, como ecuaciones diferenciales, que indican cómo evolucionará el estado futuro (Nice, 2011)

El software de simulación permite predecir esta evolución calculando los valores de las variables en cada paso mediante algoritmos numéricos basados en tiempo o eventos. Además, estas herramientas suelen integrar visualizadores que facilitan el análisis del comportamiento del sistema durante la ejecución. Programas como Simulink son ampliamente utilizados para sistemas basados en tiempo, mientras que herramientas como Simevents se enfocan en simulaciones basadas en eventos (Dorf, Modern Control Systems, 2021)

Los ingenieros recurren a la simulación por varias razones:

### **4.4.1 Ahorro de recursos.**

Es más seguro y económico modelar y simular un sistema que construir un prototipo físico (Nice, 2011)

### **4.4.2 Exploración de diseños.**

Incluso si el sistema físico no está disponible, se puede crear un modelo aproximado para analizar distintas opciones de diseño (Nice, 2011)

### **4.4.3 Optimización del desarrollo.**

La simulación permite desarrollar y ajustar software de control antes de probarlo en sistemas reales, reduciendo los costos y tiempos de prueba. (Nice, 2011)

## 4.5 MATLAB y Simulink: Fundamentos y Aplicaciones

MATLAB (Matrix Laboratory) es un entorno de programación y cálculo numérico ampliamente empleado en ingeniería, matemáticas y ciencias aplicadas. Su integración con Simulink facilita el desarrollo, modelado y análisis de sistemas dinámicos en distintas áreas. Simulink, creado por MathWorks, ofrece una interfaz gráfica basada en diagramas de bloques que permite representar ecuaciones diferenciales y diseñar sistemas de control de manera intuitiva (MathWorks, 2025)

Este entorno cuenta con una extensa biblioteca de componentes, tanto lineales como no lineales, permitiendo la simulación de sistemas en tiempo continuo, discreto o híbrido. Además, su compatibilidad con MATLAB posibilita una interacción fluida entre ambos programas, facilitando la gestión de datos, el análisis de resultados y la optimización de modelos (MathWorks, 2025)).

Gracias a estas capacidades, MATLAB y Simulink son ampliamente utilizados en la industria y la academia para el desarrollo de sistemas embebidos, automatización y telecomunicaciones. Su capacidad de simulación en lazo cerrado permite evaluar el desempeño de algoritmos de control antes de su implementación en hardware real, garantizando así su eficacia y optimización (MathWorks, 2025).

## 4.6 Simulink

La simulación de sistemas dinámicos consiste en la creación de modelos matemáticos que representan sistemas cuyo comportamiento varía a lo largo del tiempo. Estos sistemas se describen mediante un conjunto de variables que determinan su estado en cada momento y un conjunto de reglas deterministas, como ecuaciones diferenciales, que indican cómo evolucionará el estado futuro (Nice, 2011)

Definición: Simulink es un entorno de simulación basado en modelos para sistemas dinámicos. Facilita la construcción de modelos, la simulación y la verificación de sistemas de control complejos mediante bloques gráficos, permitiendo evaluar su comportamiento antes de implementarlos físicamente (Simulink, 2024)

## 4.7 Modelado de Sistemas Térmicos

El modelado de **sistemas térmicos** es fundamental en la ingeniería de control, ya que permite describir matemáticamente la transferencia de calor y la evolución de la temperatura en distintos componentes. Estos modelos pueden representarse mediante **ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia y representaciones en espacio de estados**, facilitando su implementación en herramientas de simulación como MATLAB y Simulink (Gene F. Franklin, 2009)

### 4.7.1 Principios del Modelado de Sistemas Térmicos.

Los sistemas térmicos están gobernados por la ley de conducción del calor de Fourier, la ecuación de balance de energía y la ley de enfriamiento de Newton. Matemáticamente, un sistema térmico puede expresarse como se evidencia en la Ecuación (8):

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

$q$  es el flujo de calor ( $J/s$  o  $BTU/s$ ).

$T_1, T_2$ , son temperaturas en  $^{\circ}C$  o  $^{\circ}F$ .

$R$  es la resistencia térmica en  $^{\circ}C/J.s$  o  $^{\circ}F/BTU.s$ .

La acumulación de calor en un cuerpo con **capacidad térmica**  $C$  sigue la ecuación diferencial evidenciada en la Ecuación (9):

$$C \frac{dT}{dt} = \sum q_{entrada} - \sum q_{salida} \quad \text{Ecuación (9)}$$

La Ecuación (9) es utilizada para describir sistemas térmicos en procesos industriales, climatización, electrónica y control térmico de dispositivos (Gene F. Franklin, 2009)

#### 4.7.2 Función de Transferencia en Sistemas Térmicos.

Para modelar un sistema térmico en el dominio de Laplace, se usa la función de transferencia térmica que se puede evidenciar en la Ecuación (10), se expresa como:

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{Cs+R} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$G(s)$  representa la dinámica térmica del sistema.

$Q(s)$  es la entrada (fuente de calor).

$T(s)$  es la salida (temperatura).

$R$  y  $C$  representan la resistencia y capacidad térmica del sistema, respectivamente

Este modelo es equivalente a un sistema de primer orden, con una respuesta térmica que sigue una curva exponencial hacia el equilibrio térmico. (Gene F. Franklin, 2009)

#### 4.7.3 Representación en Espacio de Estados.

La Ecuación (11), es el modelo en espacio de estados permite describir el comportamiento térmico en forma matricial:

$$\begin{aligned} \dot{[T]} &= \left[ -\frac{1}{RC} \right] [T] + \left[ \frac{1}{C} \right] [Q] \quad \text{Ecuación (11)} \\ Y &= [1][T] \end{aligned}$$

Donde la temperatura  $T$  es la variable de estado, y  $Q$  es la entrada del sistema (Gene F. Franklin, 2009)

#### 4.7.4 Ejemplo de Modelado de un Sistema Térmico.

Consideremos una habitación con aislamiento térmico parcial, donde la temperatura ambiente  $T_0$  influye en la temperatura interna  $T_1$ . El modelo dinámico se expresa como en la Ecuación (12):

$$C1 \frac{dT1}{dt} = \frac{T0-T1}{R} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

C1 es la capacidad térmica del aire en la habitación.

R es la resistencia térmica del aislamiento (Gene F. Franklin, 2009)

Este modelo permite simular cómo varía la temperatura interna ante cambios en la temperatura externa o la adición de una fuente de calor (ej., un calefactor).

#### **4.7.5 Aplicaciones del Modelado de Sistemas Térmicos.**

El modelado térmico es ampliamente utilizado en: Sistemas de climatización y refrigeración, Diseño de disipadores de calor en electrónica, Procesos industriales con control térmico, Optimización de consumo energético en edificaciones.

En Simulink, estos modelos pueden implementarse utilizando bloques de funciones de transferencia y sistemas en espacio de estados, lo que permite simular y analizar su comportamiento en tiempo real (Dorf, Modern Control Systems, 2021).

## 4.8 Análisis de Sistemas Dinámicos: Primer, Segundo y Orden Superior

Los sistemas dinámicos se pueden clasificar según el orden de la ecuación diferencial que los modela. El orden del sistema está determinado por el mayor grado de derivada presente en la ecuación, lo que influye directamente en su comportamiento y respuesta ante estímulos externos. Comprender estos sistemas es esencial en ingeniería de control, ya que permite diseñar estrategias efectivas para la regulación y optimización del desempeño del sistema (Ogata, 2010).

### 4.8.1 Sistemas de Primer Orden.

Los sistemas de primer orden Ecuación (13), se describen mediante una ecuación diferencial lineal de primer grado:

$$T \left( \frac{dy}{dt} \right) + y(t) = K u(t) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

T es la constante de tiempo del sistema.

K representa la ganancia estática.

y(t) es la salida del sistema.

u(t) es la entrada.

Estos sistemas responden a cambios en la entrada de manera exponencial, con una rapidez determinada por la constante de tiempo T. Se caracterizan por una respuesta suave y sin oscilaciones. (Ogata, 2010).

Por ejemplo, un circuito RC, donde la carga del capacitor sigue una curva exponencial al aplicar un voltaje.

En términos de función de transferencia, un sistema de primer orden se expresa como en la Ecuación (14):

$$G(s) = K / (T s + 1) \text{ Ecuación (14)}$$

Tipos de Respuesta de un Sistema de Primer Orden:

Ante un escalón unitario: La salida alcanza un 63.2% de su valor final en un tiempo igual a T.

Ante un pulso: La salida sigue una trayectoria exponencial decreciente (Ogata, 2010)

#### 4.8.2 Sistemas de Segundo Orden.

Los sistemas de segundo orden son aquellos cuya ecuación diferencial involucra derivadas de segundo grado tal como se puede evidenciar en la Ecuación (15):

$$(d^2y/dt^2) + 2 \zeta \omega_n (dy/dt) + \omega_n^2 y(t) = K u(t) \text{ Ecuación (15)}$$

Donde:

$\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema.  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema.

$\zeta$  es el coeficiente de amortiguamiento.

$K$  es la ganancia estática.  $K$  es la ganancia estática.

Un sistema masa-resorte-amortiguador, en el que una masa conectada a un resorte oscila en respuesta a una fuerza aplicada (Gene F. Franklin, 2009)

Clasificación según el coeficiente de amortiguamiento  $\zeta$

Sub amortiguado ( $\zeta < 1$ )( $\zeta < 1$ ): Presenta oscilaciones antes de estabilizarse.

Ejemplo: Un péndulo con poca fricción.

Críticamente amortiguado ( $\zeta = 1$ )( $\zeta = 1$ ): No hay oscilaciones, pero el sistema tarda el menor tiempo posible en alcanzar el estado estable.

Ejemplo: Un mecanismo de puerta hidráulica que se cierra suavemente sin rebotar.

Sobre amortiguado ( $\zeta > 1$ ): No hay oscilaciones, pero la respuesta es más lenta que en el caso críticamente amortiguado.

Ejemplo: Un sistema de suspensión con alta fricción.

En términos de función de transferencia, un sistema de segundo orden se representa como en la Ecuación (16):

$$G(s) = (K \omega_n^2) / (s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2) \quad \text{Ecuación (16)}$$

### 4.8.3 Sistemas de Orden Superior.

Los sistemas de orden superior involucran ecuaciones diferenciales de tercer orden o más. Debido a su complejidad, suelen analizarse descomponiéndolos en subsistemas de primer y segundo orden.

En general, un sistema de orden n como se evidencia Ecuación (17), está descrito por:

$$a_n \left( \frac{d^n y}{dt^n} \right) + a_{n-1} \left( \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \right) + \dots + a^1 \left( \frac{dy}{dt} \right) + a^0 y(t) = K u(t) \quad \text{Ecuación (17)}$$

Ejemplo de sistemas de orden superior

Sistemas eléctricos con múltiples inductancias y capacitancias.

Sistemas mecánicos con varias masas acopladas

Estos sistemas pueden presentar resonancia, oscilaciones complejas y dinámicas no triviales, lo que hace necesario aplicar estrategias de simplificación como la reducción de orden o la factorización de polos dominantes (Dorf, Modern Control Systems, 2021)

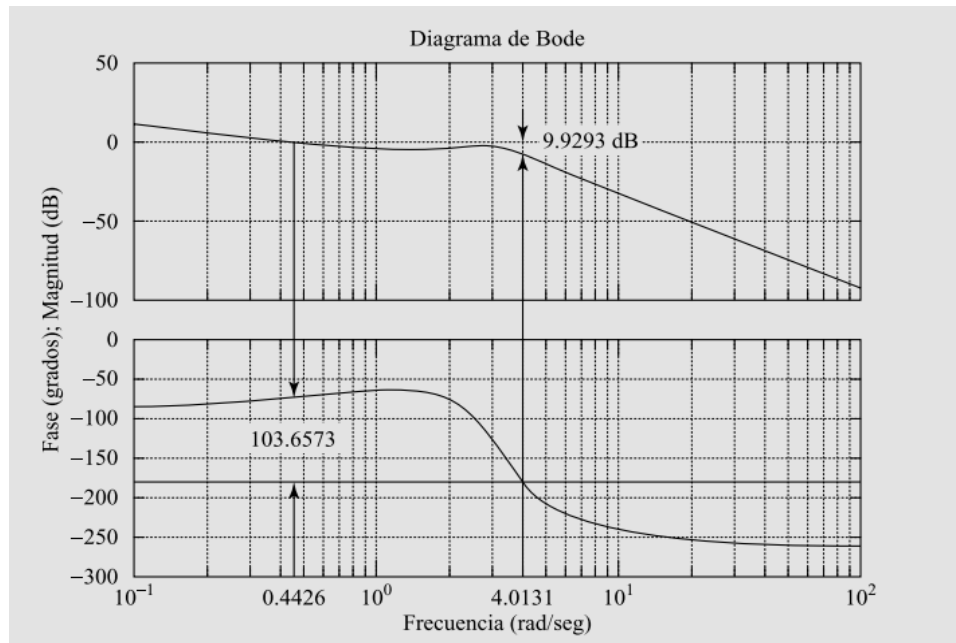
## 4.9 Control de Sistemas de Temperatura en Electrónica de Potencia

El control de sistemas de temperatura en electrónica de potencia se fundamenta en técnicas de regulación y estabilidad térmica, las cuales se aplican en circuitos eléctricos para asegurar un desempeño eficiente. En este contexto, los componentes electrónicos como relés y sensores desempeñan un papel clave en la supervisión y mantenimiento de temperaturas dentro de rangos seguros. La implementación de estrategias de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y de lógica difusa permite lograr una respuesta adaptativa y precisa en la regulación térmica dentro de un entorno de prueba. (Ogata, 2010)

En su obra Ingeniería de Control Moderna, Katsuhiko Ogata profundiza en las bases teóricas del control automático, destacando la importancia de los controladores PID en sistemas donde la regulación de temperatura es fundamental. Estos controladores minimizan la diferencia entre la temperatura deseada y la real, ajustando de manera continua la salida del sistema para mantener estabilidad térmica. Este ajuste es esencial en el control de temperatura de una celda peltier, donde prevenir daños o fluctuaciones innecesarias es crucial para el correcto funcionamiento del sistema. (Ogata, 2010)

Además, Ogata introduce el concepto de modelado matemático en sistemas de control, lo que permite analizar la variación de la temperatura en función de factores como la transferencia de calor y la inercia térmica. En aplicaciones como una maleta didáctica, esta teoría permite a los estudiantes observar en tiempo real cómo responde el sistema ante diferentes condiciones de operación, ajustando parámetros del controlador para lograr una estabilidad térmica óptima. (Ogata, 2010)

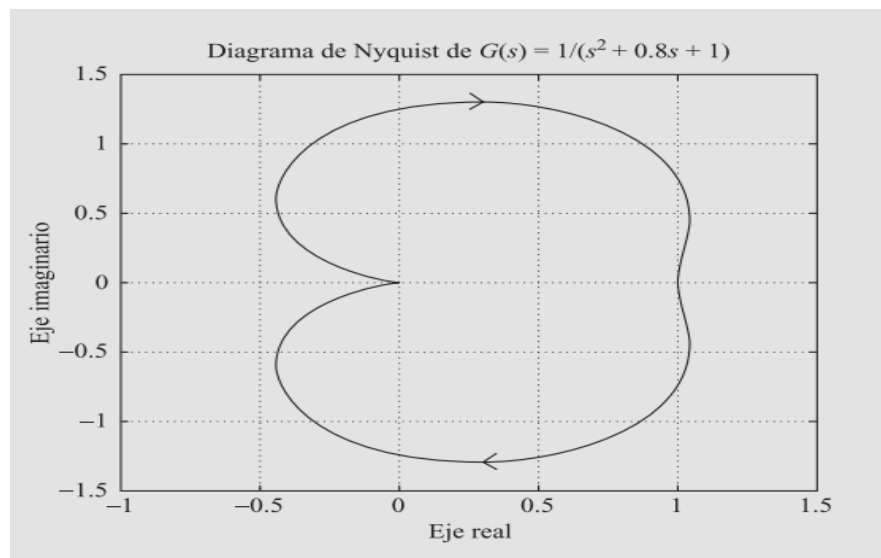
Un punto clave en el análisis de estabilidad del sistema es el uso de criterios de respuesta en frecuencia, como los representados en la (Figura 3. Ejemplo de diagrama de Bode), donde se muestra la relación entre la ganancia y la fase del sistema en función de la frecuencia. Este tipo (Ogata, 2010) de representación permite evaluar el margen de estabilidad y la respuesta del sistema, asegurando que la regulación de temperatura se mantenga dentro de un rango seguro y sin oscilaciones extremas (Ogata, 2010)



*Figura 3.* Ejemplo de diagrama de Bode.

Fuente: Ogata, 2010.

Asimismo, el diagrama de Nyquist, representado en la (Figura 4. Ejemplo de diagrama de Nyquist), proporciona una herramienta visual para analizar la estabilidad de un sistema en función de su respuesta en frecuencia. Este criterio resulta esencial para diseñar sistemas de control térmico eficientes, ya que permite determinar la estabilidad del sistema frente a perturbaciones y evaluar su comportamiento en distintas condiciones de operación (Pluginfile, 2025)



*Figura 4.* Ejemplo de diagrama de Nyquist.

Fuente: Ogata, 2010.

Finalmente, (Ogata, 2010) también enfatiza el papel de los sistemas de retroalimentación en el control térmico, en los cuales la información de la temperatura detectada se utiliza para realizar ajustes automáticos en el sistema. Esta capacidad de autorregulación garantiza que la temperatura se mantenga en un nivel estable sin la necesidad de intervención manual constante, lo que mejora la eficiencia y confiabilidad del sistema de control.

#### **4.10 Tipos de Sensores y su Aplicación en el Control de Sistemas Térmicos**

En el campo de la ingeniería y la automatización, los sensores desempeñan un papel crucial en la medición, supervisión y control de variables físicas en tiempo real. Su uso permite optimizar procesos industriales, garantizar la seguridad de los sistemas y mejorar la eficiencia energética en múltiples aplicaciones. Dentro de este proyecto, enfocado en el control térmico de una celda peltier, resulta esencial comprender la importancia de los sensores de temperatura, como el TMP36, y su integración con herramientas de instrumentación para capturar datos térmicos y regular el sistema de manera precisa (Creus, 2020).

Desde una perspectiva didáctica, el estudio de la instrumentación y los sensores es fundamental en la educación técnica, ya que proporciona a los estudiantes las herramientas necesarias para medir y controlar variables físicas en diferentes entornos de aplicación. Según Dorf (2016) la precisión y sensibilidad de los sensores son aspectos clave en la confiabilidad de los datos obtenidos, lo cual es determinante en sistemas de control de temperatura. En este contexto, sensores como el TMP36 convierten cambios térmicos en señales eléctricas, permitiendo su análisis y procesamiento mediante plataformas como Arduino y Simulink, herramientas utilizadas en este trabajo para la validación del modelo de control térmico de la celda peltier.

La medición de temperatura en instrumentación industrial, como la documentada por Creus (2020) abarca diversas tecnologías, desde termómetros de resistencia (RTD) hasta pirómetros infrarrojos, cada uno con características y aplicaciones específicas. Este conocimiento se correlaciona con la necesidad de elegir el sensor adecuado para una determinada aplicación, garantizando mediciones fiables y un control térmico eficiente. La enseñanza de estos conceptos en entornos académicos permite a los estudiantes no solo comprender la teoría detrás de la medición de temperatura, sino también desarrollar habilidades prácticas en modelado de sistemas, adquisición de datos y análisis de comportamiento térmico (Ogata, 2010).

En el marco de este proyecto, la integración de sensores de temperatura con herramientas de simulación permite mejorar la precisión en el diseño y validación de modelos de control térmico.

El uso de Simulink y MATLAB facilita la simulación del comportamiento térmico de la celda peltier antes de la implementación física, optimizando el diseño del sistema. La instrumentación industrial moderna, descrita en Creus (2020), destaca cómo la combinación de sensores precisos con algoritmos avanzados de control permite mejorar la eficiencia y estabilidad térmica en aplicaciones reales.

Así, la enseñanza de la instrumentación y los sensores no solo fortalece la comprensión teórica, sino que también fomenta el desarrollo de habilidades aplicadas en el control de sistemas térmicos, preparando a los futuros ingenieros para abordar problemas reales en la industria con un enfoque basado en la experimentación y validación de modelos.

#### **4.10.1 Principios de Medición de Temperatura.**

Existen múltiples métodos para medir la temperatura, basados en diferentes principios físicos:

Expansión térmica. Se usa en termómetros de líquido en vidrio y bimetálicos, donde la dilatación del material está directamente relacionada con la temperatura.

Variación de resistencia eléctrica. Empleado en termómetros de resistencia (RTD) y termistores, dispositivos que modifican su impedancia con el cambio de temperatura, proporcionando mediciones altamente precisas.

Generación de fuerza electromotriz (f.e.m.). Fundamento de los termopares, los cuales generan una diferencia de potencial proporcional a la temperatura entre dos metales distintos.

Emisión de radiación térmica. Utilizada en pirómetros infrarrojos y ópticos, que permiten la medición sin contacto, ideal para entornos de alta temperatura o donde la presencia de un sensor físico podría alterar la medición (Creus, 2020).

#### **4.10.2 Tipos de Sensores de Temperatura y sus Aplicaciones**

Los termómetros de resistencia (RTD). son sensores de temperatura que operan bajo el principio de variación de la resistencia eléctrica con la temperatura, permitiendo mediciones altamente precisas y estables.

Los modelos más utilizados en la industria son el Pt100 y Pt1000, fabricados en platino debido a su fiabilidad y linealidad en amplios rangos de temperatura. Su aplicación abarca desde  $-200^{\circ}\text{C}$  hasta  $600^{\circ}\text{C}$ , lo que los hace ideales para entornos donde la precisión es crítica, como procesos industriales, laboratorios y la industria química.

Gracias a su capacidad para proporcionar datos exactos y repetibles, los RTD son ampliamente empleados en sistemas de control térmico avanzados y en la calibración de otros sensores de temperatura (Creus, 2020).

Termopares. Funcionan por el efecto Seebeck, generando una señal de voltaje proporcional a la temperatura. Cubren un rango de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $2500^{\circ}\text{C}$ , dependiendo del tipo (K, J, T, R, etc.). Amplia aplicación en procesos de alta temperatura, como la industria metalúrgica y hornos industriales

Termistores. Sensores semiconductores con alta sensibilidad a cambios de temperatura. Clasificados en NTC (coeficiente negativo de temperatura) y PTC (coeficiente positivo de temperatura). Se emplean en dispositivos médicos, electrónica y sistemas de refrigeración

Pirómetros Infrarrojos y Ópticos, que permiten la medición de temperatura sin contacto físico. Utilizados en hornos, turbinas y procesos metalúrgicos. Aptos para altas temperaturas ( $> 700^{\circ}\text{C}$ ), con respuesta rápida y sin interferencia en el proceso (Creus, 2020).

#### **4.10.3 Factores que Afectan la Precisión de la Medición.**

Para obtener mediciones confiables, es importante considerar los siguientes aspectos:

Compensación de unión fría en termopares. Se deben realizar ajustes para evitar errores en la referencia térmica.

Interferencias electromagnéticas. Pueden afectar sensores eléctricos, requiriendo aislamiento adecuado.

Material y longitud del cableado. Factores que influyen en la resistencia del circuito y en la señal del sensor.

Emisividad del material. Importante en pirómetros infrarrojos, ya que la radiación térmica varía con la superficie del objeto medido (Creus, 2020).

#### **4.10.4 Factores que Afectan la Precisión de la Medición**

Aplicación en el Control Térmico de la celda peltier En el contexto de este proyecto, donde se estudia el control térmico de una celda peltier, la medición de temperatura es un factor crítico para el diseño del sistema de control. Se ha seleccionado el sensor TMP36, debido a su facilidad de integración con Arduino y Simulink, permitiendo capturar datos térmicos en tiempo real y evaluar el desempeño del modelo de control diseñado.

Además, el uso de sensores más avanzados, como termopares tipo K o RTD, podría mejorar la precisión del sistema, especialmente en experimentos que requieran análisis detallado del comportamiento térmico de la celda peltier bajo diferentes condiciones de operación (Creus, 2020).

#### **4.11 Ingeniería basada en modelos (Model-Based Design - MBD)**

La Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE, por sus siglas en inglés) es un enfoque que emplea modelos para representar diversos aspectos de un sistema, permitiendo capturar su comportamiento, funciones y características físicas. Este enfoque facilita la comprensión y el análisis de sistemas complejos, promoviendo una mejor integración de sus diferentes componentes (Gene & Powell, 2009).

Dentro de la MBSE, el desarrollo basado en modelos permite diseñar, simular y probar un sistema antes de su implementación física. Este proceso es crucial para reducir el tiempo y costo de desarrollo, al tiempo que mejora la calidad y confiabilidad del sistema. Su aplicación es frecuente en el desarrollo de software y sistemas embebidos, donde los modelos permiten simular interacciones y evaluar el comportamiento de los diferentes módulos antes de su construcción (Gene & Powell, 2009).

Un elemento clave en este enfoque es la Ingeniería Basada en Modelos (MBD, Model-Based Definition), que implica el uso de modelos tridimensionales (3D) como fuente autorizada para definir y comunicar información sobre el diseño y la fabricación de productos. Este enfoque digital elimina la necesidad de depender de planos 2D, lo que minimiza errores e inconsistencias en el proceso de producción y mejora la colaboración entre equipos multidisciplinarios (Gene & Powell, 2009).

Tal como se ilustra en la (Figura 5. Verificación y validación), la MBSE integra diferentes disciplinas, incluyendo ingeniería de software, donde se emplean métodos formales como el modelo en V y herramientas CASE; modelado de sistemas dinámicos, con aplicaciones en Matlab, Simulink y Modelica; y herramientas de diseño como CAD/CAE/PDM tradicionales. Este enfoque integral permite un desarrollo más estructurado, asegurando que los sistemas diseñados cumplan con los requisitos establecidos y optimicen su rendimiento en aplicaciones reales (Visure, 2025).

#### 4.11.1 Modelado y simulación de sistemas complejos.

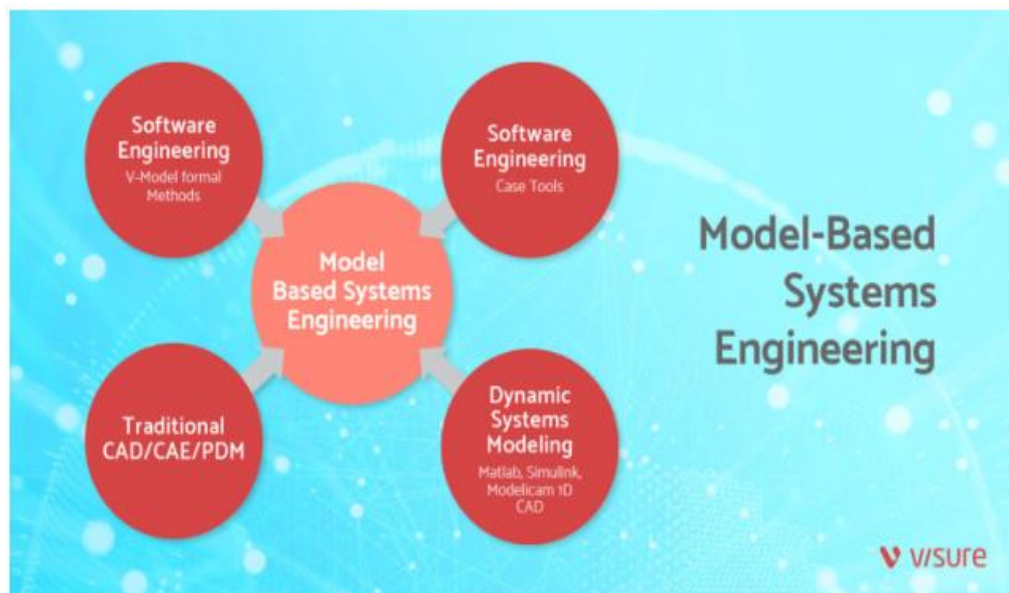
Aborda la creación de modelos precisos de sistemas físicos o software complejos, utilizando herramientas como MATLAB/Simulink para simular su comportamiento antes de su implementación física (Gene & Powell, 2009).

#### 4.11.2 Desarrollo iterativo y validación en el ciclo de diseño.

Se enfoca en el proceso de desarrollo iterativo, donde el modelo es ajustado y validado en cada etapa de diseño, permitiendo la identificación temprana de problemas y optimización de parámetros antes de la construcción del prototipo físico (Gene & Powell, 2009).

#### 4.11.3 Generación automática de código.

Un aspecto clave de MBD que permite generar automáticamente el código de control a partir de modelos simulados, reduciendo errores manuales y acelerando el proceso de desarrollo y validación de sistemas embebidos (Gene & Powell, 2009).



*Figura 5.* Verificación y validación.

Fuente: Visure, 2025.

## **4.12 Open Science y compartición de recursos experimentales**

La Open Science es una aproximación colaborativa, transparente y accesible a la investigación, que implica un cambio estructural en la manera de concebirla, ejecutarla y de difundir sus resultados. Se caracteriza por la apertura no sólo de las publicaciones sino también de los datos de investigación, las metodologías, los procesos, así como por la implicación de la ciudadanía en un entorno de investigación e innovación responsables. En otras palabras, se trata de hacer los resultados de la investigación financiada con fondos públicos accesibles en formato digital para la comunidad científica que los produce, así como para la sociedad en general que los financia, potenciando la reproducibilidad de la ciencia y la reutilización de los resultados (Lopez, 2025).

### **4.12.1 Repositorios de datos abiertos y reproducibilidad científica.**

Trata sobre el acceso libre a conjuntos de datos y resultados experimentales, facilitando la replicación y verificación de estudios científicos por parte de la comunidad, lo que fortalece la credibilidad y transparencia en la investigación (López, 2025).

### **4.12.2 Licenciamiento y propiedad intelectual en ciencia abierta.**

Explora las políticas de licencias abiertas, que permiten el uso y modificación de recursos científicos, garantizando a la vez el reconocimiento de los autores y promoviendo la distribución y reutilización del conocimiento (López, 2025).

### **4.12.3 Colaboración interdisciplinaria y acceso global.**

Analiza cómo la ciencia abierta fomenta la cooperación entre diferentes disciplinas y regiones, facilitando el acceso equitativo a herramientas experimentales, software y datos, lo que impulsa el avance de proyectos colaborativos (López, 2025).

### **4.13 Métodos Didácticos en Ingeniería Electrónica**

Este enfoque se centra en la enseñanza de sistemas de control y electrónica mediante métodos pedagógicos prácticos. Destaca el aprendizaje basado en la experiencia, donde los estudiantes adquieren habilidades técnicas al interactuar directamente con equipos y simuladores que replican condiciones reales. Las maletas didácticas son herramientas clave en este proceso, ya que permiten a los estudiantes desarrollar competencias en el diagnóstico y resolución de problemas en circuitos de control, facilitando una comprensión profunda del diseño, implementación y ajuste de sistemas de control (Ogata, 2010).

La aplicación de estos métodos en la enseñanza de ingeniería electrónica es esencial para un aprendizaje efectivo y práctico, favoreciendo la conexión entre la teoría y la práctica. Las maletas didácticas permiten a los estudiantes aprender de manera más significativa, ya que, al trabajar directamente con los equipos, pueden consolidar los conocimientos teóricos con experiencias prácticas. Además, estas herramientas no solo mejoran la comprensión técnica, sino que también motivan a los estudiantes a enfrentar problemas reales, preparándolos para su futuro profesional en el campo de la ingeniería (Nice, 2011).

#### 4.14 Controladores PID

Los controladores PID (proporcional-integral-derivativo) son los componentes fundamentales para los sistemas de automatización y del control actual. Los PID utilizan mecanismos de control para la retroalimentación en bucle cerrado, sistema que permite ajustar de forma continua las salidas en función de la diferencia entre un punto de ajuste deseado y el valor medido. Los controladores PID cuentan con un sistema de retroalimentación para controlar sistemas dinámicos. Se entiende que el controlador es el “cerebro” del circuito, es el encargado de tomar las decisiones de las acciones para llevar a cabo. Este controlador realiza acciones de comparación de señales del proceso contra el punto de control, además de enviar la señal de control apropiada al elemento final de control para mantener una variable controlada (Lozano et al., 2012).

En su núcleo, operan utilizando tres términos básicos: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D), cada término opera de manera única con la señal de salida en función de la diferencia entre el punto de ajuste deseado y el valor medido real, que generalmente se conoce como el error. Con el término Proporcional (P) se da respuesta al error presente, el cual genera una salida proporcional a su magnitud, por medio de una acción correctiva de carácter inmediato, el P se encarga de minimizar los errores. Con el término Integral (I) se asisten los errores persistentes y las desviaciones a largo plazo. Adicionalmente, con el término Derivativo (D) se presenta una anticipación a los cambios futuros en el error evaluando su tasa de cambio (Maloy, 2024).

El controlador PID añade una función adicional a los circuitos y es el control anticipado hacia dónde va el proceso, en este controlador se mide la variación del parámetro  $\tau_D$ , el cual determina la anticipación del sistema frente a los cambios; sin embargo, es necesario la revisión al momento de la manipulación del mismo, puesto que se requiere sintonizar de forma adecuada para introducir el ruido a la salida ya que el régimen puede volverse no controlable. Estos controladores son usados principalmente en la automatización industrial y los sistemas de control, en aplicaciones para los sistemas de temperatura, presión, nivel y velocidad, ya que

tienen como ventaja la facilidad en la implementación y ajuste, ser versátiles y de opción común en la industria (Jiménez, 2014).

## 5 Metodología

### 5.1 Tipo de proyecto

El presente trabajo de grado se clasifica como un proyecto de desarrollo experimental, dado que tiene como finalidad no solamente validar teorías existentes en el área de control automático, sino proponer e implementar una solución práctica mediante la combinación de herramientas de simulación, hardware y estrategias didácticas.

Este tipo de proyecto, según la OCDE (2015), se orienta a la creación o perfeccionamiento de productos o prototipos tecnológicos que puedan ser aplicados en contextos reales, a través de la integración de conocimientos previos con nuevas aplicaciones funcionales. En este caso, se busca diseñar un sistema de control térmico basado en un modelo simulado y replicarlo físicamente en un entorno educativo.

El enfoque experimental permite establecer una relación directa entre el comportamiento simulado de un sistema dinámico y su implementación real, utilizando componentes accesibles como Arduino, sensores de temperatura y actuadores eléctricos. De esta forma, se crea una plataforma de aprendizaje que permite a los estudiantes interactuar con variables físicas reales y comparar su comportamiento con los resultados teóricos previstos en la simulación. Este enfoque contribuye al fortalecimiento de competencias prácticas y analíticas en áreas como la electrónica de potencia, el procesamiento de señales y la automatización industrial, fundamentales en la formación del ingeniero electricista.

Además, el proyecto responde a una necesidad detectada en el proceso de enseñanza-aprendizaje del control automático, específicamente en lo relacionado con la dificultad que enfrentan los estudiantes para conectar el conocimiento teórico con su aplicación práctica. La propuesta de una maleta didáctica integrada con Simulink permite superar estas barreras, ofreciendo una herramienta tangible, portable y versátil, que puede ser utilizada en laboratorios, aulas o proyectos de investigación aplicada. En este sentido, el desarrollo experimental no solo se orienta al cumplimiento de objetivos técnicos, sino también al impacto pedagógico dentro del programa de Ingeniería Eléctrica de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

## 5.2 Método

La metodología se desarrolla en cinco fases, orientadas a cumplir con los objetivos del proyecto:

Fase 1: Simulación del sistema de control térmico en Simulink. Se inicia con la configuración y parametrización del modelo de control térmico, estableciendo condiciones iniciales como la temperatura ambiente, los límites de operación de la celda peltier, y el comportamiento esperado del sistema ante distintos escenarios. Se utiliza Simulink como entorno de simulación para representar la dinámica térmica del sistema, aplicando estrategias de control binario tipo on/off. En esta etapa se evalúa la respuesta del modelo ante variaciones de temperatura, analizando aspectos como el tiempo de establecimiento, la estabilidad y el error en estado estacionario.

Fase 2: Diseño y ensamblaje del prototipo físico. Se procede a la construcción de una maleta didáctica, que integra los componentes requeridos para la implementación del sistema físico. Esto incluye la placa Arduino Mega, sensores de temperatura (TMP36 o LM35), módulos de conmutación como relés de estado sólido o drivers MOSFET, una celda peltier de 50 W, y una fuente de alimentación. Se realiza el montaje de los dispositivos en un contenedor modular, asegurando la correcta conexión eléctrica y estructural de cada elemento. Esta fase tiene como propósito ofrecer una herramienta transportable y segura para entornos académicos.

Fase 3: Recolección y análisis de datos. Con ambos sistemas (modelo simulado y prototipo físico) en funcionamiento, se recopilan datos relacionados con la temperatura, el estado del actuador (encendido/apagado) y la evolución temporal del sistema ante distintos valores de consigna. La medición se realiza utilizando sensores integrados en el prototipo, y se comparan los resultados con los obtenidos en la simulación. Se aplican métricas como el Error Cuadrático Medio (MSE) para cuantificar la precisión del modelo y su correspondencia con el comportamiento real.

Fase 4: Ajuste y validación del modelo. A partir del análisis de resultados, se identifican posibles discrepancias entre el modelo simulado y la planta experimental. En caso necesario, se ajustan parámetros del modelo (por ejemplo, constantes térmicas, factores de ganancia, umbrales

de activación) para lograr una mayor fidelidad. Esta etapa busca garantizar que la simulación represente de forma precisa la respuesta térmica observada en el sistema físico, asegurando la validez técnica y educativa del prototipo.

Fase 5: Documentación. Como etapa final, se realiza la documentación del sistema, incluyendo el diseño eléctrico, el esquema de conexiones, las instrucciones de uso, y una guía práctica con actividades sugeridas para estudiantes. Esta información se compila en un manual técnico y se acompaña de un informe de resultados, con el fin de poner a disposición de la comunidad académica un recurso completo para la formación en control automático mediante aprendizaje práctico.

### **5.3 Instrumentos de recolección de información.**

#### **5.3.1 Fuentes primarias.**

Las fuentes primarias utilizadas en este proyecto corresponden a textos académicos y científicos de rigor que han servido como fundamento para el modelado, análisis y validación de sistemas de control. Destaca especialmente la obra de Ogata (2010), la cual proporciona las bases para entender los sistemas dinámicos desde una perspectiva matemática, incluyendo el uso de ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia, representación en espacio de estados y controladores PID. Estos conceptos han sido esenciales para diseñar y validar el comportamiento térmico de la planta bajo estudio.

Adicionalmente, se incorporan como fuentes primarias los trabajos de autores como Dorf, Nice, Franklin y Creus, quienes abordan temas complementarios relacionados con la instrumentación, la simulación computacional, la dinámica de sistemas térmicos y la aplicación de sensores en entornos industriales.

Estas referencias enriquecen la visión del proyecto, al integrar tanto la teoría clásica del control como las tendencias actuales en simulación y control embebido. La inclusión de conceptos como la ingeniería basada en modelos (Model-Based Design) y la validación cruzada de sistemas permite un análisis integral del fenómeno físico desde múltiples perspectivas.

Estas fuentes primarias, por tanto, constituyen el eje central del soporte teórico del trabajo. A través de ellas se ha logrado fundamentar el diseño de los algoritmos de control, la estructura del modelo simulado y los criterios de validación utilizados para comparar los resultados del prototipo físico. Su aplicación se refleja en cada una de las fases del proyecto, desde la simulación inicial hasta la documentación técnica del sistema desarrollado.

#### **5.3.2 Fuentes secundarias.**

Las fuentes secundarias consultadas han complementado el marco teórico y metodológico del proyecto, aportando información práctica y actualizada sobre herramientas y técnicas específicas. Estas incluyen tutoriales, guías técnicas y documentación oficial de plataformas como Arduino,

MathWorks (Simulink y MATLAB), y repositorios académicos en línea. A través de estos recursos se ha logrado entender y aplicar configuraciones específicas necesarias para la integración del modelo simulado con el hardware físico.

Entre las fuentes secundarias también se encuentran artículos de divulgación técnica, blogs especializados y videos educativos que ilustran el funcionamiento de componentes como sensores LM35, relés de estado sólido y módulos de control PWM. Aunque estas fuentes no ofrecen aportes teóricos originales, han sido fundamentales para la toma de decisiones durante la fase de ensamblaje y puesta en marcha del sistema, permitiendo resolver problemas técnicos de conexión, programación y validación de señales.

Estas fuentes han sido útiles para enriquecer el proceso de documentación, permitiendo estructurar guías de usuario y material de apoyo que acompañan la maleta didáctica. Su valor reside en su aplicabilidad directa al contexto del proyecto, contribuyendo al desarrollo exitoso del prototipo y al cumplimiento del objetivo de transferir conocimiento técnico a través de una herramienta práctica y pedagógica.

## **6 Resultados**

### **6.1 Simular el modelo de control térmico en Simulink.**

Se realiza evaluando su desempeño bajo distintas condiciones, validando su respuesta ante variaciones de temperatura y proporcionando datos que respalden el diseño del prototipo físico.

#### **6.1.1 Primera interacción Simulink.**

Para validar la comunicación entre Simulink y Arduino, se llevó a cabo una primera prueba basada en el control del encendido y apagado de un LED a través de una salida digital de la placa de Arduino como se muestra en la (Figura 6). Para ello, se diseñó un modelo en Simulink que incorpora un pulsante, el cual activa y desactiva la salida digital correspondiente.

Se realizó la conexión física entre la placa Arduino y un panel de conexiones para garantizar la correcta transmisión de la señal. Posteriormente, la simulación se ejecutó directamente desde la plataforma de Simulink, permitiendo comprobar la comunicación entre el software y la placa Arduino. Finalmente, se verificó el correcto funcionamiento del sistema observando que el LED respondiera adecuadamente a la activación y desactivación mediante el pulsante.

#### **6.1.2 Descarga e Instalación de Matlab.**

Se inició el proceso descargando e instalando el software Matlab en el equipo de trabajo

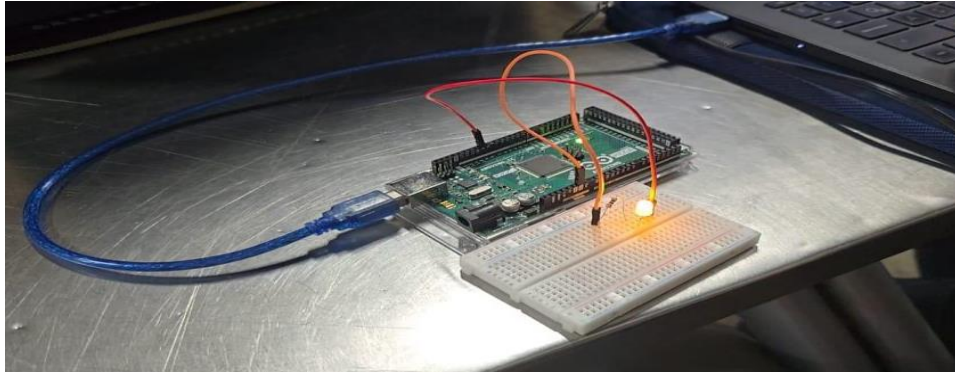
#### **6.1.3 Descarga de Librerías en Simulink.**

Desde la plataforma de MathWorks, se procedió a la descarga e instalación de las librerías necesarias para el uso de Simulink con el hardware de Arduino.

#### **6.1.4 Prueba Inicial: Control de un LED con Arduino.**

Para validar la comunicación entre Simulink y Arduino, se llevó a cabo una primera prueba basada en el control del encendido y apagado de un LED a través de una salida digital de la placa de Arduino. Para ello, se diseñó un modelo en Simulink que incorpora un pulsante, el cual activa y desactiva la salida digital correspondiente, observar la (Figura 6) para validar el led encendido.

Se realizó la conexión física entre la placa Arduino y un panel de conexiones para garantizar la correcta transmisión de la señal. Posteriormente, la simulación se ejecutó directamente desde la plataforma de Simulink, permitiendo comprobar la comunicación entre el software y la placa Arduino. Finalmente, se verificó el correcto funcionamiento del sistema observando que el LED respondiera adecuadamente a la activación y desactivación mediante el pulsante.



*Figura 6.* Led encendido mediante pulsante.  
Fuente: Diseño propio.

### 6.1.5 Prueba número dos:

Control de una entrada analógica con un potenciómetro.

Se llevó a cabo una segunda prueba en la que se parametriza una entrada analógica mediante el uso de un potenciómetro para controlar un servomotor y la intensidad de un LED.

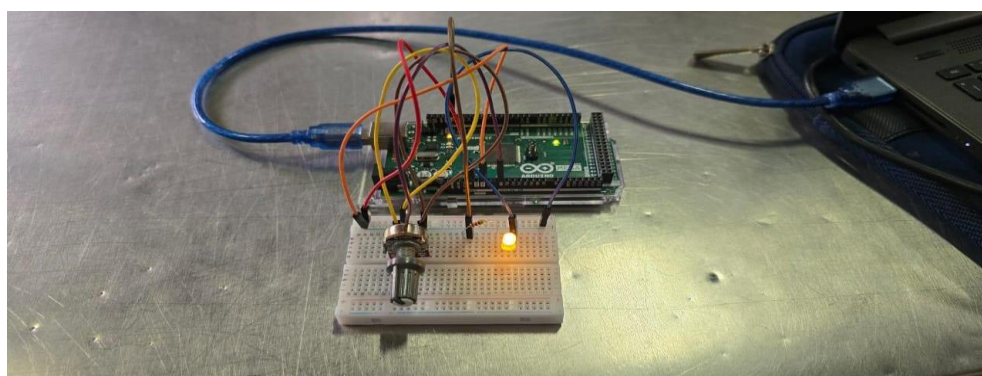
En este modelo de Simulink, se utilizó un potenciómetro como entrada analógica para controlar simultáneamente el ángulo de un servomotor y la intensidad de un LED. Para ello, el bloque Analog Input del paquete de Arduino lee la señal del potenciómetro, la cual se procesa mediante dos caminos.

En el primero, la señal del bloque Analog Input es conectada con un bloque Gain para ajustarla al rango de 0 a 180°, permitiendo su uso en el bloque Servo Write, que controla la posición del servomotor.

En el segundo, la misma señal proveniente del bloque Analog Input, conectándola con otro bloque Gain que se convierte al rango de 0 a 255, de modo que pueda ser interpretada por el

bloque PWM Write, el cual genera una señal de ancho de pulso (PWM) para regular el brillo del LED. Previamente, se realizó la conexión física entre la placa Arduino y un panel de conexiones, asegurando la correcta distribución de las señales y la alimentación de los dispositivos.

Posteriormente, se llevó a cabo la simulación desde la plataforma de Simulink, permitiendo verificar la comunicación entre el software y el hardware. De esta manera, la rotación del potenciómetro influye tanto en el ángulo del servomotor como en la intensidad lumínica del LED, proporcionando un control simultáneo de ambos dispositivos, como se ve en la figura 7.



*Figura 7.* Prueba de señal analógica.  
Fuente: Diseño propio.

### 6.1.6 Prueba número 3:

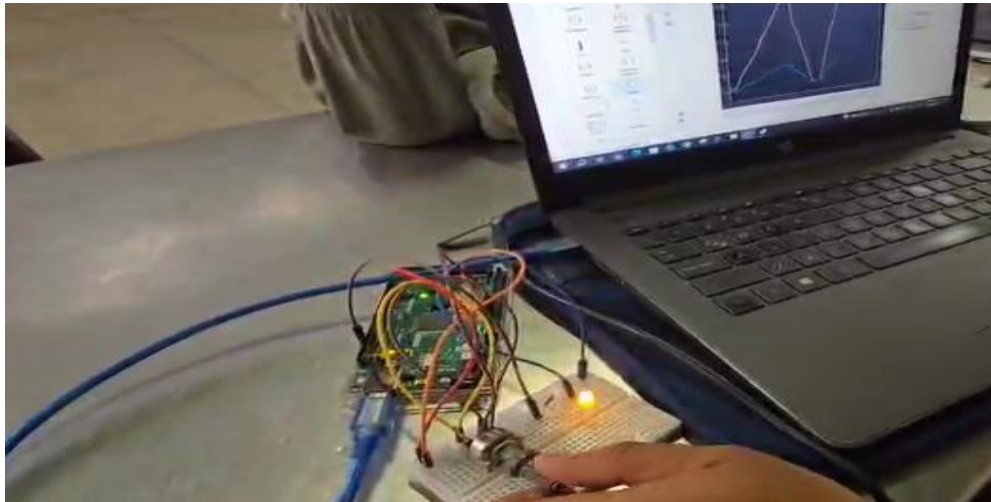
parametrización de entrada y salida analógica PWM. Para lograr que un LED varíe su intensidad mediante un potenciómetro, utilizando un Arduino y el entorno gráfico de Simulink, se comienza con el montaje del circuito. El potenciómetro se conecta de forma que uno de sus extremos vaya a 5V, el otro a GND y la terminal central al pin analógico A0 del Arduino. El LED se conecta al pin digital 13, que es compatible con salida PWM, pasando por una resistencia limitadora de 220 ohmios para protegerlo de sobre corriente.

Una vez conectado el hardware, se trabaja en Simulink. Se debe abrir un modelo nuevo y arrastrar los siguientes bloques desde la librería de Simulink Support Package for Arduino Hardware: Un bloque Analog Input, configurado para leer desde el pin A0, un bloque “Data Type Conversion”, necesario para convertir el dato entero en un tipo adecuado para operaciones numéricas, un bloque Gain, si se desea escalar la señal (por ejemplo, para mapear el valor de 0-

1023 a 0-255, que es el rango del PWM), un bloque PWM Output, que se configura para actuar sobre el pin 13 y finalmente un Scope para visualizar la señal en tiempo real (ver figura 9).

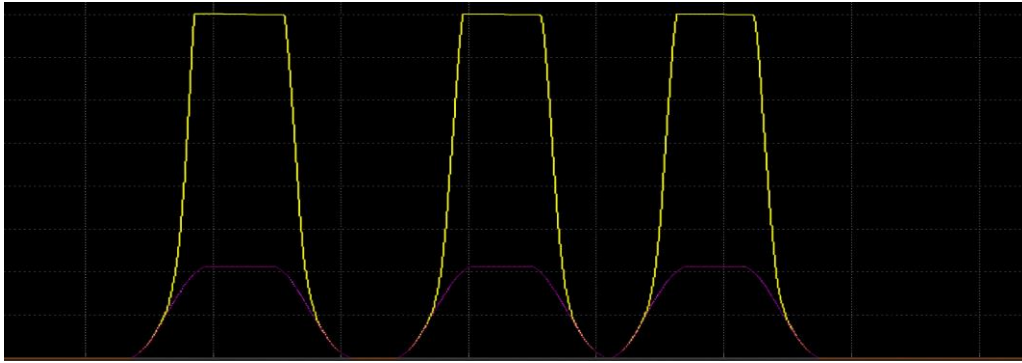
Los bloques se conectan en serie siguiendo el flujo: Analog Input → Data Type Conversion → Gain → PWM Output. En el bloque de ganancia, si se quiere ajustar el valor al rango PWM típico de 8 bits, se puede aplicar una constante de ganancia de aproximadamente  $(255/1023) \approx 0.25$ . Esto asegura que la salida PWM refleje correctamente el giro del potenciómetro.

Antes de ejecutar el modelo, se accede a Model Settings (Ctrl + E), se selecciona la opción de Hardware Implementation, se elige el tipo exacto de placa Arduino (por ejemplo, "Arduino Mega 2560"), y se especifica el puerto COM correspondiente si se requiere. Luego, se guarda el modelo y se selecciona la opción Deploy to Hardware, lo que permite que el código generado se cargue directamente en el Arduino sin necesidad de programarlo manualmente.



*Figura 8.* Variación de intensidad del led según ajuste potenciómetro.  
Fuente: Diseño propio.

Una vez cargado el modelo, al girar el potenciómetro se observa cómo la intensidad del LED conectado al pin 13 cambia suavemente, demostrando el control proporcional del brillo mediante PWM y la lectura analógica como se muestra en la figura 8, obteniendo la señal presentada en la figura 9.

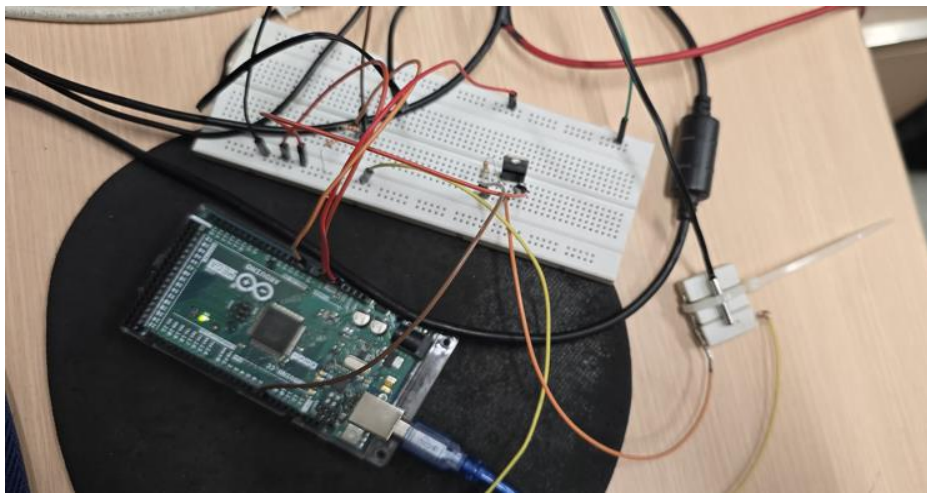


*Figura 9.* Variación de ondas de potenciómetro (amarilla) y PWM (morada).

Fuente: Diseño propio.

#### 6.1.7 prueba número 4:

Control on/off dada la variación de temperatura. El montaje experimental mostrado en la figura 10 tuvo como objetivo implementar un sistema de control de temperatura mediante un controlador on/off, utilizando Simulink y una placa Arduino Mega 2560. El sistema está compuesto por un conjunto de resistencias conectadas en paralelo de un valor de  $33\ \Omega$  y un termistor NTC 10K, permitiendo la activación o desactivación automática del calentamiento según el valor medido (Nice, 2011; Ogata, 2010).

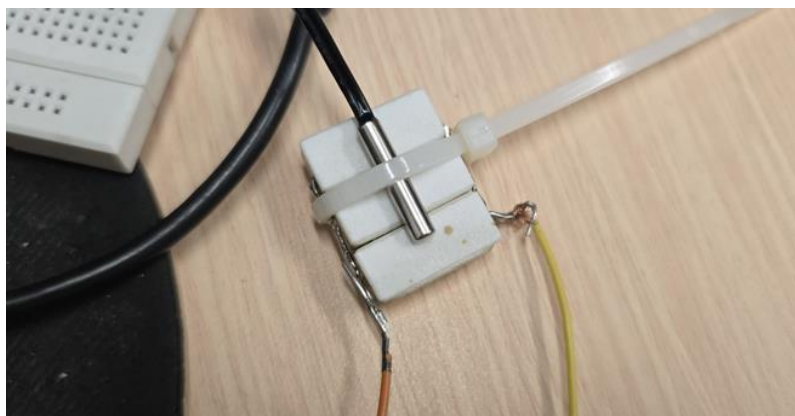


*Figura 10.* Montaje de control on/off de temperatura con Simulink y Arduino.

Fuente: Diseño propio.

Para el montaje físico y adquisición de datos. Se utilizó una placa de pruebas (proto-board) para el montaje de las resistencias en paralelo, conectadas a la salida digital del Arduino (pin 9) y a un sensor de temperatura (tipo sonda, conectado al pin analógico A0). El sensor NTC 10K

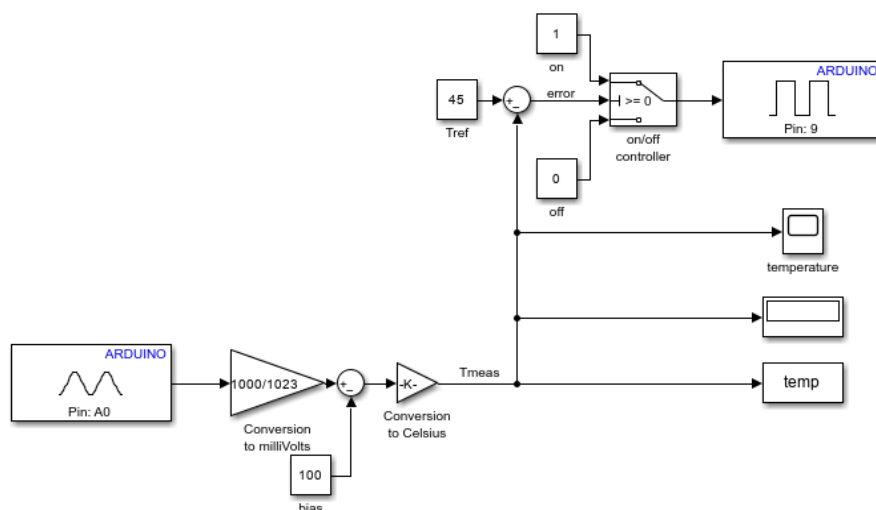
permitió la adquisición de la variable de proceso (temperatura), mientras que las resistencias que se muestran en la figura 11 actuaron como elemento calefactor del sistema. El circuito fue alimentado con 5 VDC provenientes del propio Arduino.



*Figura 11.* Resistencias conectadas en paralelo con sensor de temperatura.

Fuente: Diseño propio.

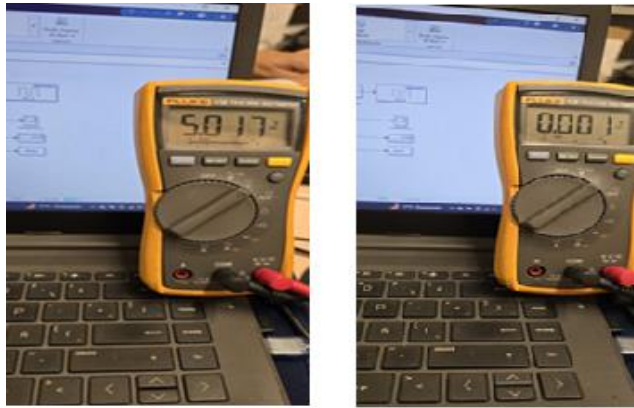
Para el modelado y control en Simulink. Se diseñó un modelo que integra la adquisición de datos desde Arduino, el procesamiento de la señal y la lógica de control on/off (Figura 12). El bloque de lectura analógica recibe la señal del sensor de temperatura (pin A0), la cual es convertida de unidades digitales a milivoltios y posteriormente a grados Celsius, multiplicando por 100 (para sensores tipo LM35).



*Figura 12.* Diseño de adquisición de datos desde Arduino.

Fuente: Diseño propio.

El valor de temperatura medido ( $T_{meas}$ ) se compara con el valor de referencia ( $T_{ref}$ ), por ejemplo,  $45.6^{\circ}\text{C}$ . Si la temperatura medida es inferior al valor de referencia, el controlador activa la salida digital (pin 9), permitiendo el paso de 5 VDC a las resistencias; si la temperatura supera el valor de referencia, la salida se desactiva y el voltaje aplicado es 0 VDC (véase Figura 13). Este tipo de lógica es característica de los sistemas de control on/off, ampliamente documentados en la literatura de control automático (Nice, 2011; Ogata, 2010).



*Figura 13.* Voltaje cuando la temperatura es inferior a la establecida y cuando la supera.

Fuente: Diseño propio.

Para la visualización y análisis de resultados. Durante la ejecución del modelo, Simulink permite visualizar en tiempo real la evolución de la temperatura mediante gráficas (véase Figura 14), así como el estado de la señal de control (on/off).



*Figura 14.* Visualización en Simulink de control on/off.

Fuente: Diseño propio.

Se observó que, cuando la temperatura es inferior al setpoint, el sistema aplica 5 VDC a las resistencias, aumentando la temperatura; al superar el setpoint, el voltaje cae a 0 VDC, desactivando el calentamiento. Este comportamiento es característico del control on/off y puede apreciarse en la respuesta escalonada de la señal de temperatura y de control.

Se debe tener consideraciones sobre el control on/off. El control on/off implementado en Simulink replica el funcionamiento de un termostato básico: el actuador solo tiene dos estados posibles (encendido/apagado), lo que puede provocar fenómenos de oscilación o "chattering" cerca del punto de consigna, especialmente si no se implementa una banda muerta (deadband) (Dorf, 2021; Nice, 2011; Ogata, 2010).

En este experimento, el sistema responde de manera rápida y sencilla a las variaciones de temperatura, siendo adecuado para aplicaciones donde la precisión extrema no es crítica.

#### **6.1.8 Prueba número 5:**

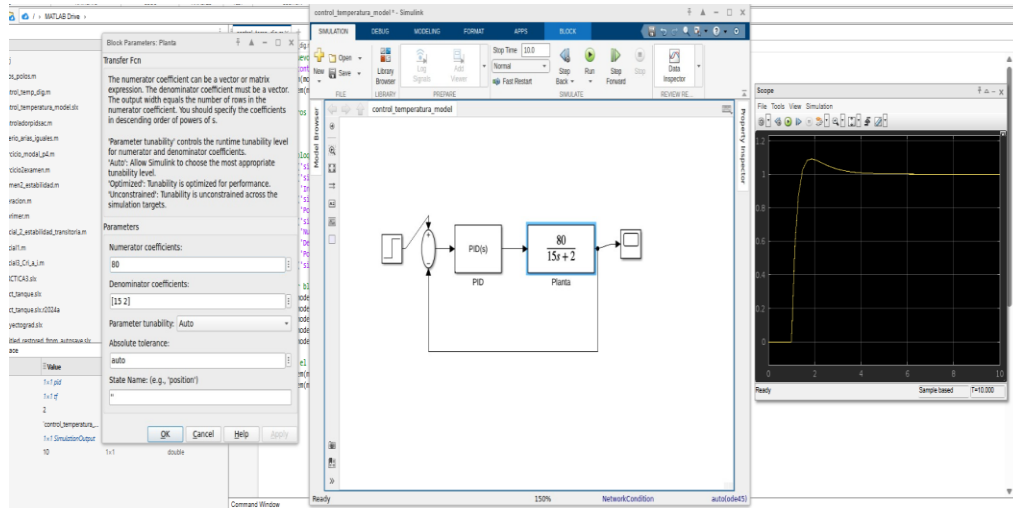
Simulación digital y análisis de resultados obtenidos. Para la simulación digital del sistema de control térmico mostrada en la figura 16, se desarrolló un modelo en Simulink basado en la estructura de lazo cerrado, compuesto por un bloque de entrada tipo Step, un controlador PID, una función de transferencia térmica de primer orden y un Scope para visualizar la salida.

Esta configuración representa un sistema térmico típico, en el cual la planta simula la respuesta térmica de un elemento como una celda peltier, y el controlador PID ajusta la señal de entrada con el fin de alcanzar el valor deseado de temperatura sin oscilaciones ni sobre impulsos excesivos.

El modelo desarrollado en Simulink generó una respuesta exponencial creciente de temperatura frente al tiempo, propia de un sistema térmico de primer orden. En la simulación, al aplicar una señal escalón como entrada, se observó que la temperatura simulada comenzó en un valor inicial cercano a 0 °C y alcanzó aproximadamente 60 °C en un lapso de 70 segundos, estabilizándose progresivamente sin presentar sobreimpulsos ni oscilaciones. Esta respuesta suave y controlada

refleja una adecuada configuración de la planta modelada mediante la función de transferencia

$$G(s) = \frac{80}{15s+2}, \text{ así como una sintonización efectiva del controlador PID.}$$



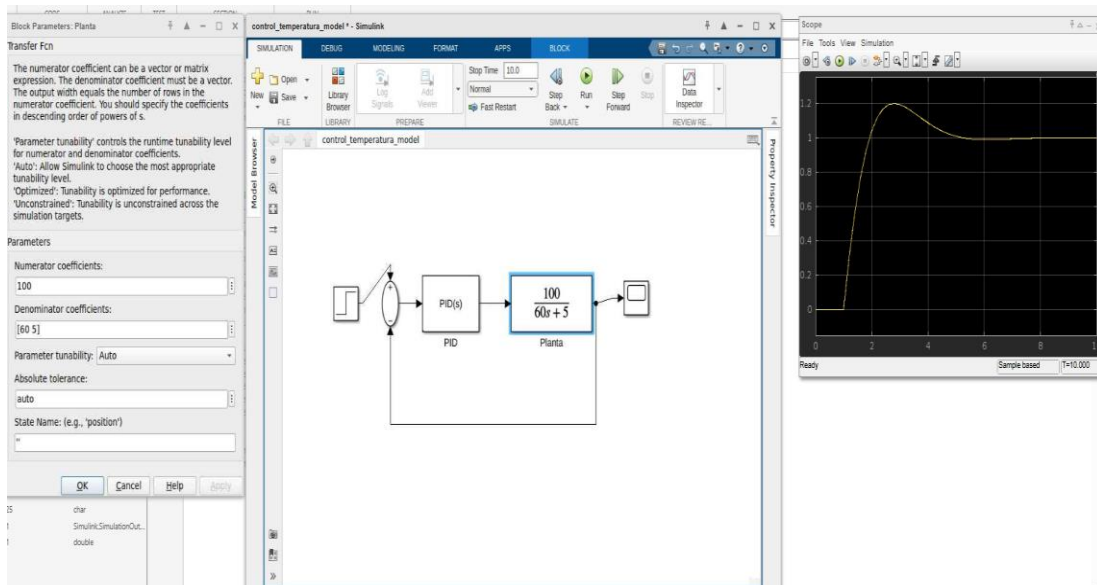
*Figura 15.* Simulación digital sistema de control térmico 1.

Fuente: Diseño propio.

La gráfica obtenida permitió visualizar cómo la salida del sistema seguía fielmente el comportamiento esperado: una transición gradual desde el 0 % hasta el 100 % del valor final, alcanzando alrededor del 63 % del valor objetivo en un tiempo cercano a 7.5 segundos, lo cual concuerda con la constante de tiempo teórica del modelo. Este análisis evidencia que el controlador es capaz de conducir el sistema térmico hacia el valor de consigna de manera estable y precisa, lo que valida su aplicación práctica y la fidelidad del modelo como herramienta de diseño y simulación en entornos académicos y experimentales.

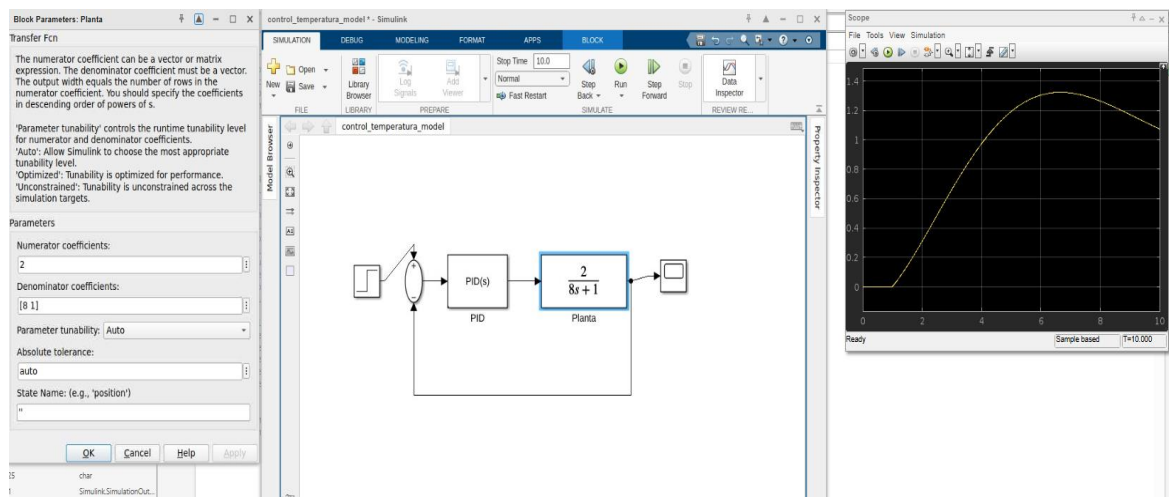
En la simulación mostrada en la figura 15 con la planta modelada por la función de transferencia  $G(s) = \frac{100}{60s+5}$ , se observa que el sistema responde al escalón de entrada con una rápida elevación de la señal de salida, seguida de un sobreimpulso moderado antes de estabilizarse. La gráfica muestra que, tras el sobreimpulso inicial, la respuesta converge suavemente hacia el valor de referencia sin presentar oscilaciones sostenidas, lo que indica una buena estabilidad general del sistema. Este comportamiento es característico de un sistema térmico de primer orden bajo control PID, donde la acción del controlador permite que la

temperatura alcance la consigna de manera eficiente, aunque con un pequeño pico transitorio que podría optimizarse ajustando los parámetros del controlador.



*Figura 16.* Simulación digital sistema de control térmico 2.  
Fuente: Diseño propio.

En la figura 16, utilizando la planta  $G(s) = \frac{2}{8s+1}$ , la respuesta del sistema es más lenta y presenta un sobreimpulso más pronunciado. La curva muestra un ascenso gradual, alcanzando un máximo que supera el valor de referencia antes de estabilizarse.



*Figura 17.* Simulación digital sistema de control térmico 3.  
Fuente: Diseño propio.

El tiempo de establecimiento es mayor en comparación con la simulación de la figura 17, y el sobreimpulso indica que la acción del controlador PID podría requerir una mejor sintonización para reducir este efecto. Sin embargo, al igual que en el anterior modelo, la respuesta termina estabilizándose sin oscilaciones prolongadas, lo que demuestra que el sistema es estable y funcional para aplicaciones donde la velocidad de respuesta no es crítica, pero sí lo es la estabilidad final.

Al comparar las tres simulaciones digitales desarrolladas en Simulink, se aprecia con claridad cómo la dinámica de la planta y la sintonización del controlador PID determinan el desempeño global del sistema de control térmico. La simulación de la figura 16, correspondiente a la función  $G(s) = \frac{80}{15s+2}$ , destaca por presentar una transición suave y controlada, alcanzando el valor de consigna sin sobreimpulsos ni oscilaciones, lo que evidencia una adecuada configuración y sintonización del sistema para aplicaciones que requieren alta estabilidad y precisión.

Por otro lado, la simulación de la figura 17, asociada a la función  $G(s) = \frac{100}{60s+5}$ , muestra una respuesta más rápida, pero con un sobreimpulso moderado antes de estabilizarse, reflejando un sistema eficiente y estable, aunque susceptible a pequeños picos transitorios que podrían optimizarse aún más mediante ajustes en el controlador. Finalmente, la simulación de la figura 18, que emplea la función  $G(s) = \frac{2}{8s+1}$ , revela una respuesta más lenta y con un sobreimpulso más pronunciado, lo que pone de manifiesto una mayor inercia térmica y la necesidad de una mejor sintonización del PID para minimizar el pico y reducir el tiempo de establecimiento.

Estas diferencias entre las respuestas de cada modelo resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente tanto la función de transferencia de la planta como los parámetros del controlador para cumplir con los requisitos específicos de desempeño en sistemas térmicos, y consolidan a Simulink como una herramienta esencial para el análisis, comparación y optimización de estrategias de control en entornos académicos y de ingeniería.

## **6.2 Análisis comparativo entre simulaciones digitales y experimentación física.**

A la luz del objetivo general de este proyecto, que busca desarrollar un módulo de control de temperatura mediante adquisición de datos y simulación en Simulink para comparar el comportamiento del modelo simulado con el de una planta física experimental en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la I.U. Pascual Bravo, se realizó un análisis comparativo entre las simulaciones digitales y las pruebas físicas implementadas. Las simulaciones digitales, construidas en Simulink a partir de modelos matemáticos de primer orden y funciones de transferencia representativas, permitieron observar respuestas ideales, suaves y continuas, sin ruido ni discretización, lo que facilita la visualización y el ajuste de los parámetros del sistema y del controlador PID (Ogata, 2010; Nice, 2011).

Entre las virtudes de este enfoque digital destaca la posibilidad de experimentar con distintas estrategias de control en un entorno seguro, la rápida obtención de resultados y la claridad para analizar fenómenos como el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y la estabilidad. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es su carácter idealizado, ya que no incorpora fenómenos propios de la realidad como el ruido, los retardos físicos, la discretización de señales y las perturbaciones ambientales, lo que puede generar diferencias significativas respecto al comportamiento real del sistema (Dorf, 2021).

En contraste, las simulaciones físicas, realizadas mediante la adquisición de datos en tiempo real con sensores de temperatura conectados a un Arduino y controladas tanto por PID como por lógica on/off, evidenciaron una respuesta escalonada y con pequeñas fluctuaciones, resultado de la resolución limitada del conversor analógico-digital (ADC) del Arduino, el ruido térmico y las variaciones ambientales. La respuesta térmica real mostró mayor inercia, retardo y microoscilaciones, así como la influencia directa de la dinámica on/off en el comportamiento del sistema, donde el actuador alterna entre estados de encendido y apagado según el umbral de temperatura.

Entre las virtudes de la simulación física se encuentra su capacidad para reflejar fielmente las condiciones reales de operación, permitiendo a los estudiantes enfrentarse a los desafíos prácticos

del control, como la calibración de sensores, la interpretación de señales discretizadas y la gestión de perturbaciones externas. Además, la experiencia experimental fortalece la comprensión de conceptos fundamentales como la constante de tiempo, la ganancia térmica, la histéresis y el ruido de medición, aportando un valor pedagógico significativo (Ogata, 2010). Sin embargo, estas pruebas presentan falencias asociadas a la mayor complejidad para ajustar parámetros, la presencia de ruido que puede dificultar el análisis y la necesidad de recursos físicos y tiempo para la implementación y repetición de experimentos.

La comparación entre ambas aproximaciones evidencia que, mientras la simulación digital en Simulink es una herramienta poderosa para el diseño, análisis y ajuste teórico de sistemas de control térmico, la experimentación física es indispensable para validar y comprender las limitaciones y particularidades de los sistemas reales. La integración de ambas metodologías cumple plenamente el objetivo del proyecto, ya que permite contrastar la teoría con la práctica, identificar las diferencias inherentes entre el modelo ideal y el sistema físico, y formar ingenieros con una visión integral y crítica sobre el diseño y la implementación de sistemas de control automático en entornos académicos y experimentales. Así, el modelo simulado no solo cumple con su función pedagógica, sino que demuestra ser una herramienta efectiva para el análisis y la mejora del sistema físico implementado, en concordancia con la literatura especializada (Ogata, 2010; Dorf, 2021; Nice, 2011).

### **6.3 Construir una maleta didáctica con los componentes necesarios para el control.**

Para construir una maleta didáctica con los componentes necesarios para el control térmico de una celda peltier, facilitando la experimentación práctica del sistema de control para estudiantes y docentes, se siguen dos pasos fundamentales: la revisión de los componentes, haciendo su descripción y el montaje de todas las partes en el maletín.

Se procede con la descripción de los componentes utilizados en el proyecto: se describen uno a uno destacando sus características fundamentales y presentando una imagen ilustrativa de cada uno.

Caja de Aluminio de 4 Compartimentos: Caja Redline fabricada en aluminio con refuerzos de PVC, ofrece buena resistencia y ligereza. Tiene interior acolchado, broches metálicos de seguridad y cuatro compartimentos que facilitan la organización de sensores y placas. Es ideal para proteger y transportar componentes electrónicos como se muestra en la figura 18.



*Figura 18.* Maleta de aluminio de 4 compartimentos construido en aluminio-plástico.  
Fuente: propia.

Mini Pc MaxMini B1: El MaxMini B1 es un mini PC compacto y liviano. Incorpora Windows 11 preinstalado y un procesador Intel Gemini Lake N4000, 8 GB de memoria RAM y 128 GB de almacenamiento, ampliable mediante tarjeta Micro SD y ranura SSD.

En términos de conectividad, dispone de Wi-Fi de doble banda de 2.4 GHz y 5 GHz, puerto LAN Gigabit de 1000 Mbps y Bluetooth 4.2. Su variedad de puertos incluye dos USB 3.0, dos USB 2.0, una salida HDMI, una VGA, un puerto RJ45, un conector de audio de 3.5 mm y entrada de energía de 12V/2A. (Bmax, 2025) (ver figura 19).



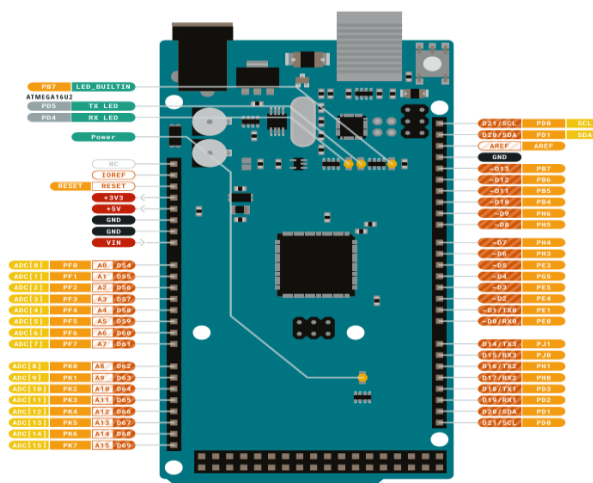
*Figura 19.* Mini Pc MaxMini B1 utilizado para el control de las prácticas.  
Fuente: Bmax, 2025.

PC Monitor: Este dispositivo presentado en la figura 20, cuenta con un panel digital de 10,1 pulgadas con un brillo de  $250 \text{ cd/m}^2$  y una resolución de  $1024 \times 600$ . Ofrece compatibilidad con HDMI (versiones 1.1 y 1.2) y VGA con una resolución de  $800 \times 600$ . Dispone de entrada de video de 2 canales y entrada de audio de 1 canal, se alimenta mediante una fuente doméstica de 110-240V con salida de 12V.



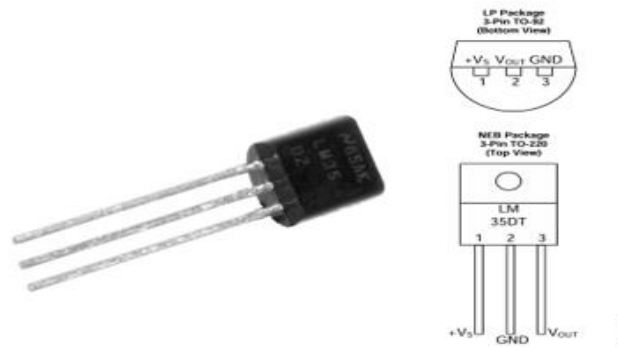
*Figura 20.* PC Monitor de 10.1 pulgadas utilizado como interfaz de prácticas.  
Fuente: propia.

Arduino Mega 2560 Rev3: El Arduino Mega 2560 de la figura 21, es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reinicio. (Arduino Mega, 2025)



*Figura 21.* Arduino mega 2560 R3 utilizado para las pruebas.  
Fuente: Arduino, 2025.

Sensor de temperatura LM35: El LM35 es un sensor de temperatura de precisión en circuito integrado, con una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados, eliminando la necesidad de conversiones adicionales. No requiere calibración externa y ofrece una precisión típica de  $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$  a temperatura ambiente y  $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$  en su rango de operación de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . (Sensor LM35, 2025), en la figura 22 se puede observar el sensor LM35 y su respectiva conexión



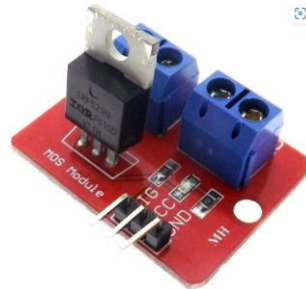
*Figura 22.* Sensor LM35 para la medición de temperatura.  
Fuente: Sensor LM35, 2025.

Termómetro digital: Dispositivo que mide la temperatura de forma rápida y precisa. El dispositivo presentado en la figura 23, tiene una pantalla clara y fácil de leer, y algunos modelos vienen con una punta flexible para mayor comodidad. Emite un sonido cuando termina de medir y se apaga solo para ahorrar batería. Guarda la última medición, mide entre  $32.0^{\circ}\text{C}$  y  $42.9^{\circ}\text{C}$ , y puede mostrar la temperatura en grados Celsius o Fahrenheit. Funciona con una pila pequeña del tipo LR44.



*Figura 23.* Termómetro Digital.  
Fuente: Propia.

Tarjeta driver MOSFET IRF520: Es un módulo electrónico que permite controlar dispositivos que requieren mayor corriente (ver figura 24), como motores o luces LED de alta potencia, este módulo puede manejar cargas de hasta 9 amperios y es compatible con señales PWM, funciona enviando una señal de 5V al pin de control (Gate), lo que activa el paso de corriente a través del dispositivo conectado. Es una herramienta útil y práctica para proyectos electrónicos que requieren controlar cargas potentes desde una placa como Arduino. (Naylamp Mechatronics, 2025)



*Figura 24.* Tarjeta MOSFET IRF520 para manejar la potencia del actuador.  
Fuente: Propia.

Cable USB Tipo B para Arduino de 50 cm: Es un accesorio de conexión que permite la comunicación entre dispositivos electrónicos y computadoras, siendo ampliamente utilizado en impresoras, escáneres y equipos de control industrial (ver figura 25). Cuenta con un conector USB tipo A en un extremo y un conector USB tipo B en el otro, asegurando una conexión estable y confiable para la transferencia de datos y alimentación de dispositivos compatibles.



*Figura 25.* Cable USB Tipo B para Arduino de 50 cm.  
Fuente: Propia.

Generalmente fabricado con un revestimiento transparente o de color, ofrece protección contra interferencias electromagnéticas. Su diseño flexible y resistente garantiza una larga vida útil, facilitando su uso en entornos domésticos, educativos e industriales. (Electrostore, 2025)

Cable conexión fácil Dupont de 30 cm: Cable de conexión rápida de 30 cm M-H, ideal para facilitar la interconexión en prototipos, sensores y diversos dispositivos electrónicos. Estos elementos presentados en la figura 26, son especialmente útiles en proyectos con microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi, AVR, entre otros.



*Figura 26.* Cable conexión fácil Dupont de 30 cm.  
Fuente: Propia.

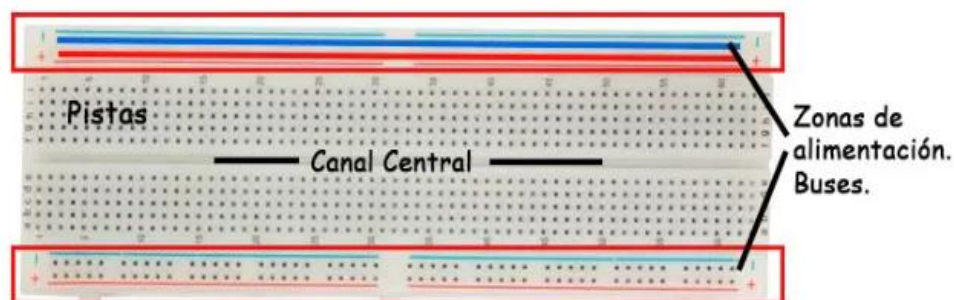
Conector 250vac 15a, con suiche para panel: El conector para panel de 250 VAC y 15 A de la figura 27 es un componente versátil diseñado para aplicaciones electrónicas que requieren una conexión segura y funcional. Este conector cuenta con polo a tierra, interruptor (suiche) integrado y un porta fusible, lo que permite una mayor protección y control en el sistema eléctrico. Su diseño compacto y color negro lo hace ideal para integrarse fácilmente en paneles y dispositivos. Estas características lo convierten en una solución práctica para proyectos que demandan seguridad y facilidad de instalación (Didácticas Electrónicas, 2025).



*Figura 27.* Conector 250vac 15A, con suiche para panel.  
Fuente: Propia.

Protoboard – Placa de pruebas: La placa de pruebas presentada en la figura 28, también conocida como protoboard o breadboard, es una herramienta fundamental en la electrónica para

el diseño y prueba de circuitos sin necesidad de soldadura. Está compuesta por orificios interconectados internamente mediante un material conductor, permitiendo insertar componentes y cables para ensamblar prototipos de manera rápida y sencilla. Su diseño facilita la modificación y experimentación con circuitos antes de llevarlos a una fabricación definitiva. (El Octavo Bit, 2025)



*Figura 28.* Protoboard que se monta en el módulo de experimentación.

Fuente: El Octavo Bit, 2025.

Celda de Peltier modelo TEC1-12706: La celda de Peltier de la figura 29, es un dispositivo que pasa calor de una cara a la otra al ser aplicada una diferencia de potencial con una polaridad específica entre sus dos terminales. Al cambiar el sentido de la corriente cambia la dirección del flujo de calor. La celda utilizada tiene unas dimensiones de 40mm x 40 mm x 3.6mm. una corriente de trabajo 4.3<sup>a</sup> 6 amperios al aplicar una tensión de 12 voltios. La tensión máxima aplicable es de 15 voltios de corriente directa. Opera a temperaturas entre -30 y 70 grados Celsius.



*Figura 29.* Celda Peltier TEC1-12706.

Fuente: Propia

Para el ensamble final de maleta, se realizó interconectando el computador con la pantalla a través del cable HDMI, conectando la alimentación de la pantalla y el computador, enlazando el computador con las terminales RXD y TXD mediante un convertidor USB-TTL. Además, se fijaron los elementos a los soportes de acrílico para montarlos en el maletín.



*Figura 30.* Distribución de elementos en el maletín.

Fuente: El Octavo Bit, 2025.

La figura 30 presenta la distribución de los componentes del maletín. Se observa que la base contiene cuatro terminales tipo banana de 4 mm, en los que se conecta el módulo de experimentación. Las conexiones son el voltaje de 12VDC, la tierra, los datos TXD y RXD, para la polarización del módulo con el computador interno.

## 7 Conclusiones

La simulación del modelo de control térmico en Simulink permitió observar el comportamiento dinámico de la celda peltier unidas en paralelo bajo diversas condiciones. La utilización de funciones de transferencia facilitó un análisis detallado de la respuesta térmica del sistema.

Las pruebas iniciales con Arduino, relés y sensores NTC demostraron la viabilidad de establecer una comunicación efectiva entre el entorno de simulación y el hardware físico. Esta integración valida el uso de Simulink como herramienta educativa y de prototipado rápido.

El enfoque didáctico implementado promueve el aprendizaje activo, permitiendo a los estudiantes visualizar en tiempo real los efectos de la variación de parámetros de control sobre la temperatura. Esto refuerza su capacidad para diseñar, implementar y evaluar sistemas de control térmico.

Las pruebas iniciales permitieron confirmar que el led funciona como un sistema conmutado de tipo binario, presentando únicamente dos estados: encendido (energizado) y apagado (sin energía). Esta característica es fundamental para el desarrollo de un sistema de control ON-OFF, ya que facilita el diseño de lógicas de activación simples y robustas.

Las salidas digitales del Arduino fueron evaluadas mediante rutinas básicas de encendido-apagado, logrando una sincronización adecuada con el relé. Esta etapa fue clave para asegurar que el sistema de control pueda enviar señales adecuadas a los actuadores sin fallos de lógica ni desfases.

Se identificó la importancia de definir una metodología de prueba organizada, donde se establezcan fases claras de validación: primero la lógica digital de control, luego la conexión y respuesta del actuador, y finalmente la integración con sensores y control térmico. Esto reduce significativamente la posibilidad de errores críticos al momento de implementar el sistema completo.

Las pruebas realizadas con el servomotor permitieron comprobar su capacidad de respuesta ante señales PWM generadas desde la placa Arduino. Se observó que el servo reacciona de forma estable y precisa dentro de su rango de giro, validando su utilidad como actuador didáctico para representar sistemas de control en tiempo real

La conexión del potenciómetro como entrada analógica permitió modular el valor de referencia que controla el ángulo del servomotor. Esta relación entrada-salida demostró ser efectiva para ilustrar principios de control proporcional y de respuesta dinámica ante cambios continuos de entrada, sentando bases conceptuales para el control analógico de temperatura.

El montaje con el potenciómetro y el servomotor se consolidó como una herramienta intermedia para introducir conceptos de respuesta en tiempo real, resolución de señales analógicas y conversión de valores en grados de movimiento, lo cual resulta análogo a la posterior conversión de temperatura en señales de control.

Los resultados de la simulación respaldaron la implementación del módulo experimental (maleta didáctica), el cual fue construido con base en los parámetros validados y documentados, cerrando así el ciclo completo de diseño, prueba y aplicación educativa.

## 8 Recomendaciones

A partir del trabajo desarrollado y los resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a mejorar el diseño, la implementación y la proyección del sistema construido:

Registrar todo el proceso de forma clara y ordenada: Es importante llevar un archivo con los diagramas de conexión, parámetros utilizados en la simulación y resultados obtenidos. Esto servirá de guía en futuras modificaciones o en la réplica del proyecto para otros grupos o asignaturas.

Incluir una banda muerta en el control on/off: Se observó que el sistema puede generar oscilaciones cuando se encuentra cerca del valor de referencia. Para reducir este comportamiento, es recomendable aplicar una zona de tolerancia que evite el encendido y apagado constante de las resistencias.

Explorar otros tipos de controladores: Aunque el enfoque principal fue el control on/off, sería útil implementar y probar un controlador PID en el mismo prototipo. Esto permitiría comparar el comportamiento de ambos métodos y ampliar las posibilidades de análisis en clase.

Mejorar el diseño físico del módulo didáctico: Para facilitar su uso en el aula o en laboratorio, se sugiere organizar mejor los componentes dentro de la maleta, asegurar las conexiones y utilizar materiales que protejan el equipo frente al transporte o uso frecuente.

Desarrollar una interfaz básica de usuario: Sería conveniente incorporar una visualización más amigable de los datos en tiempo real, por ejemplo, una gráfica de temperatura o un indicador del estado del sistema, que facilite la interpretación de los resultados durante las prácticas.

Mantener actualizado el entorno de trabajo: Es recomendable verificar periódicamente las versiones de MATLAB, Simulink y las librerías de soporte para Arduino, ya que las actualizaciones suelen corregir errores y mejorar la compatibilidad con los dispositivos.

Aprovechar el módulo en otras asignaturas: El prototipo puede ser útil no solo para control automático, sino también para cursos de instrumentación, sistemas embebidos o prácticas de electrónica, promoviendo así un aprendizaje más aplicado y transversal.

## 9 Referencias

Creus, A. (2020). Instrumentación. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Dorf, R. H. (2016). Modern control systems. California.

Dorf, R. H. (2021). Modern control systems. California.

Fractal. (2017). Tipos de mantenimiento. <https://www.fractal.com/es/blog/tipos-de-mantenimiento>

Fitzgerald, A. K. (2003). Electric machinery. McGraw-Hill International.

Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2009). Feedback control of dynamic systems (6th ed.). New Jersey.

García-Peñalvo, F. J. (2019). Inteligencia artificial. Una perspectiva desde la ficción a la realidad. <https://bit.ly/2Q0jap0> <https://doi.org/10.5281/zenodo.2818903>

Jiménez, J. (2014). Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero. *Revista Tecnología en Marcha*, 27(8), 31. [https://www.researchgate.net/publication/291072181\\_Conceptos\\_de\\_controladores\\_PID\\_e\\_implementacion\\_en\\_un\\_horno\\_de\\_fundicion\\_de\\_acero](https://www.researchgate.net/publication/291072181_Conceptos_de_controladores_PID_e_implementacion_en_un_horno_de_fundicion_de_acero)

Law, A. M. (2007). Simulation modeling and analysis. Tucson, Arizona, USA.

Lopez, F. A. (2025). Open Science MOOC. <https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/opensciencemooc.pdf>

Lozano, L., Rodríguez, L., & Giraldo, D. (2012). Diseño, implementación y validación de un controlador PID autosintonizado. *TecnoLógicas*, (28).

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-77992012000100003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992012000100003)

Maloy, G. (2024, junio 19). ¿Qué es un controlador PID? DEWEsoft.

<https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-controlador-pid>

MathWorks. (2025). MATLAB. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Medh, O. K. (2012). National level workshop on MATLAB and selected applications. Gauhati University, Assam, India.

Murray, K. J. (2008). *Feedback systems*. Oxford.

Nice, N. S. (2011). *Control systems engineering*. California.

Nyquist, B. Y. (2016). Trabajo de simulación 5: Diagrama de Bode.

<http://blog.espol.edu.ec/sistemasdecontrol/files/2020/08/TS5.pdf>

OECD. (2015). Manual de Frascati 2015. [https://www.oecd.org/es/publications/2015/10/frascati-manual-2015\\_g1g57dcb.html](https://www.oecd.org/es/publications/2015/10/frascati-manual-2015_g1g57dcb.html)

Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Pearson.

Pluginfile. (2025). *Sistemas lineales 2*.

[https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/134462/mod\\_resource/content/5/principal/notas/pdf/Unidad8.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/134462/mod_resource/content/5/principal/notas/pdf/Unidad8.pdf)

Simulink. (2024). Simulink. <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>

Taylor & Francis. (2018). *Planning & design of engineering systems*.

Visure. (2025). Ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE): Guía completa.  
<https://visuresolutions.com/es/gu%C3%ADa-mbse/que-es-mbse/>

## 10 Anexos

## 0Anexo 1 Ecuaciones

$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t)$	Ecuación (1)
$G_s = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}$	Ecuación (2)
$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$	Ecuación (3)
$G(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2(w_n^s + w_n^2)}$	Ecuación (4)
$x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad y(t) = Cx(t) + Du(t)$	Ecuación (5)
$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad y(t) = Cx(t) + Du(t)$	Ecuación (6)
$G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$	Ecuación (7)
$q = \frac{T_1 - T_2}{R}$	Ecuación (8)
$C \frac{dT}{dt} = \sum q_{entrada} - \sum q_{salida}$	Ecuación (9)
$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{Cs + R}$	Ecuación (10)
$[T] = \left[ -\frac{1}{RC} \right] [T] + \left[ \frac{1}{C} \right] [Q]$ $Y = [1][T]$	Ecuación (11)
$C1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_0 - T_1}{R}$	Ecuación (12)
$T \left( \frac{dy}{dt} \right) + y(t) = K u(t)$	Ecuación (13)
$G(s) = K / (Ts + 1)$	Ecuación (14)
$(d^2 y / dt^2) + 2 \zeta \omega_n (dy / dt) + \omega_n^2 y(t) = K u(t)$	Ecuación (15)
$G(s) = (K \omega_n^2) / (s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2)$	Ecuación (16)
$a_n \left( \frac{d^n y}{dt^n} \right) + a_{n-1} \left( \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \right) + \dots + a^1 \left( \frac{dy}{dt} \right) + a^0 y(t) = K u(t)$	Ecuación (17)