

**CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE EXPERIMENTACIÓN DE CONTROL DE  
TEMPERATURA CON LÁMPARA INCANDESCENTE**

**HILDER ALBERTO CASTRO PORRAS**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

**CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE EXPERIMENTACIÓN DE CONTROL DE  
TEMPERATURA CON LÁMPARA INCANDESCENTE**

**HILDER ALBERTO CASTRO PORRAS**

**Trabajo de grado para optar al título de tecnólogo en eléctrica**

**Asesor técnico:**

**Carlos Mario Moreno Paniagua**

**Ingeniero eléctrico**

**Asesor metodológico:**

**Andrés Fernando Pérez González**

**Magister en Ingeniería**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

## Tabla de contenido

	<b>Pag.</b>
1 Planteamiento del problema.....	11
1.1 Descripción .....	11
1.2 Formulación .....	12
2 Justificación .....	13
3 Objetivos.....	15
3.1 Objetivo general.....	15
3.2 Objetivos específicos .....	15
4 Marco teórico.....	16
4.1 Temperatura.....	16
4.2 Control de temperatura.....	17
4.3 Controlador PID.....	20
4.4 Modelado de sistemas.....	23
4.5 Herramientas para simulación y control.....	24
4.6 Sensores de temperatura.....	28
5 Metodología.....	31
5.1 Tipo de proyecto .....	31
5.2 Método .....	31
5.3 Instrumentos de recolección de información .....	32
6 Resultados.....	34
7 Conclusiones.....	54
8 Recomendaciones .....	55
9 Referencias bibliográficas.....	56

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ensayo y error para llevar el proceso de la temperatura.....	18
Figura 2. Problemas cuando el operario no está en el proceso. ....	19
Figura 3. PID Block Diagram, Arturo Urquizo.....	20
Figura 4. Funcionamiento de la plataforma Simulink.....	26
Figura 5. Termopar con sus accesorios de protección y transmisión.....	29
Figura 6. Resistencia de temperatura RTD con termo pozo. ....	29
Figura 7. Termistores de diferentes tipos y encapsulados.....	30
Figura 8. Temperatura de bombilla respuesta. ....	35
Figura 9. MATLAB ON OFF con filtro pasa bajo.....	37
Figura 10. Temperatura bombilla ON/OFF con filtro pasa bajo.....	38
Figura 11. Filtrado con banda muerta. ....	38
Figura 12. Temperatura bombilla ON/OFF con banda muerta. ....	39
Figura 13. MATLAB control progresivo. ....	40
Figura 14. Bombilla bajo control proporcional.....	40
Figura 15. Bombilla bajo P control. ....	41
Figura 16. MATLAB Modelo PI Control en Simulink.....	42
Figura 17. Bombilla bajo PI control.....	43
Figura 18. Computador PC BOX.....	44
Figura 19. Display HDMI del maletín didáctico.....	45
Figura 20. Maletín Aluminio Redline. ....	45
Figura 21. Conector 250VAC/15A, con suiche, para Panel. ....	46
Figura 22. Fuente 5v/5ª para alimentación del módulo didáctico.....	46
Figura 23. Arduino nano. ....	47
Figura 24. Disposición de los elementos del maletín.....	48
Figura 25. Disposición interna del computador y las fuentes de alimentación.....	49
Figura 26. Interconexión del experimento a la palca de Arduino. ....	49
Figura 27. Ubicación del módulo de experimentación durante las prácticas. ....	50
Figura 28. Control Embebido que se comunica con la placa. ....	51

## Resumen

### CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE EXPERIMENTACIÓN DE CONTROL DE TEMPERATURA CON LÁMPARA INCANDESCENTE

**HILDER ALBERTO CASTRO PORRAS**

Este proyecto tiene como finalidad desarrollar un módulo didáctico que permita realizar prácticas de control de temperatura utilizando una lámpara incandescente. El objetivo es brindar a los estudiantes una herramienta práctica con la cual puedan comprender y aplicar conceptos básicos de automatización, especialmente en sistemas de lazo cerrado. Se utilizó una metodología de tipo aplicada, con énfasis en la experimentación y el desarrollo de un prototipo funcional con Arduino y sensores de temperatura.

A lo largo del proyecto se modeló el comportamiento térmico del sistema, se implementaron diferentes estrategias de control (como ON/OFF, proporcional y PI), y se analizaron los resultados obtenidos mediante pruebas reales y simulaciones. El módulo construido demostró ser útil como recurso pedagógico, ya que permite observar en tiempo real la respuesta de un sistema ante diferentes condiciones de control. Además, se diseñó una guía de ejercicios prácticos para facilitar su uso en el aula. En conjunto, el proyecto aporta una solución accesible y efectiva para apoyar el aprendizaje en temas de control automático.

*Palabras claves:* Control de temperatura, control automático, *Simulink*, MATLAB, Arduino.

## **Abstract**

The purpose of this project is to develop a teaching module that allows for temperature control practices using an incandescent lamp. The objective is to provide students with a practical tool with which to understand and apply basic automation concepts, especially in closed-loop systems. An applied methodology was used, with an emphasis on experimentation and the development of a functional prototype using Arduino and temperature sensors.

Throughout the project, the system's thermal behavior was modeled, different control strategies (such as ON/OFF, proportional, and PI) were implemented, and the results obtained were analyzed through real-life tests and simulations. The constructed module proved to be a useful teaching resource, as it allows for real-time observation of a system's response to different control conditions. In addition, a practical exercise guide was designed to facilitate its use in the classroom. Overall, the project provides an accessible and effective solution to support learning in automatic control.

*Keywords:* Temperature control, automatic control, Simulink, MATLAB, Arduino.

## Glosario

**Arduino:** Plataforma de hardware libre basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo integrado. Se utiliza para construir dispositivos electrónicos interactivos.

**Ciclo de trabajo (Duty Cycle):** Porcentaje del tiempo en el que una señal está en estado alto dentro de un período determinado, comúnmente usado en señales PWM.

**Control en lazo cerrado:** Sistema de control que utiliza retroalimentación de la salida para ajustar la entrada y mantener la variable controlada en el valor deseado.

**Control ON/OFF:** Estrategia de control simple que enciende o apaga un actuador dependiendo de si la variable medida está por debajo o por encima del valor de referencia.

**Control proporcional (P):** Método de control que ajusta la salida en función directa del error presente entre el valor deseado y el valor medido.

**Control proporcional-integral (PI):** Técnica de control que combina una acción proporcional con una acción integral para eliminar el error en estado estacionario.

**Función de transferencia:** Representación matemática de la relación entre la entrada y la salida de un sistema dinámico en el dominio de Laplace.

**Lazo abierto:** Sistema de control que no utiliza retroalimentación; actúa solo con base en la entrada sin considerar la salida.

**Modelo de primer orden:** Representación simplificada de un sistema cuya respuesta dinámica puede ser descrita con una única constante de tiempo y una ganancia.

**PWM (Pulse Width Modulation):** Técnica de modulación que controla la cantidad de energía entregada a una carga mediante el ajuste del ciclo de trabajo de una señal digital.

**Relé de estado sólido:** Dispositivo electrónico que permite conmutar corriente alterna o continua sin partes móviles, usando señales de control de bajo voltaje.

**Sensor TMP36:** Sensor de temperatura analógica que proporciona una salida lineal proporcional a la temperatura medida en grados Celsius.

**Setpoint:** Valor objetivo que se desea alcanzar o mantener en un sistema de control automático.

**Simulink:** Entorno de simulación gráfica integrado con MATLAB, utilizado para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos.

**Sistema embebido:** Sistema electrónico diseñado para realizar funciones específicas dentro de un dispositivo, generalmente con restricciones de recursos y sin intervención directa del usuario.

## Introducción

El control de temperatura es un tema fundamental en muchos procesos eléctricos e industriales. Mantener una temperatura adecuada ayuda a proteger equipos, mejorar la eficiencia energética y evitar fallos que puedan afectar la operación de sistemas como motores, transformadores o dispositivos electrónicos. En la formación de tecnólogos e ingenieros, es importante que estos conceptos se puedan estudiar no solo de forma teórica, sino también mediante experiencias prácticas.

Este trabajo de grado busca desarrollar un módulo didáctico que permita a los estudiantes realizar prácticas de control de temperatura con una lámpara incandescente. Para ello, se diseñó un sistema que combina componentes electrónicos como sensores, Arduino, y un entorno de simulación con MATLAB y *Simulink*. El módulo permite probar diferentes tipos de control, como ON/OFF, proporcional y PI, y observar su comportamiento real.

Comparar estos métodos de control no solo resulta relevante desde lo académico, sino que también es clave para desarrollar un entendimiento más profundo de cómo cada técnica se comporta frente a una misma situación. Al poner en práctica diferentes estrategias como el control ON/OFF, proporcional y PI, es posible evidenciar diferencias importantes en términos de desempeño del sistema, que van más allá de la teoría. Por ejemplo, mientras el control ON/OFF es simple y fácil de implementar, tiende a generar oscilaciones o parpadeo que pueden afectar la durabilidad del actuador. El control proporcional, por su parte, mejora la estabilidad del sistema, pero puede dejar un error constante en estado estacionario. Finalmente, el control PI busca corregir ese error, aunque introduce riesgos de oscilación si no se ajustan bien sus parámetros.

A través de esta comparación se espera observar cómo cada técnica influye en variables como la estabilidad del sistema, el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura deseada, la precisión con que se mantiene esa temperatura (error en estado estacionario) y el nivel de esfuerzo que requiere el actuador, lo cual se relaciona con el consumo energético. Analizar estos

aspectos permite comprender no solo cuál es el control más eficaz en un escenario dado, sino también cuál es el más eficiente o el más adecuado según las condiciones del proceso.

Estos resultados son fundamentales para que los estudiantes comprendan las implicaciones técnicas y prácticas de cada tipo de control, y así puedan evaluar cuál solución se adapta mejor a distintas aplicaciones. Al enfrentarse a decisiones de diseño o ajustes en procesos reales de automatización, contar con esta experiencia previa facilita una toma de decisiones más crítica, fundamentada y contextualizada.

## 1 Planteamiento del problema

### 1.1 Descripción

El control de temperaturas es un aspecto crítico para garantizar la productividad, durabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos e industriales. Además, resulta esencial para asegurar la integridad y rendimiento de los sistemas en entornos de alta carga y operación constante. Dicho control resulta especialmente relevante en procesos donde el calor excesivo puede llevar a fallos en motores, transformadores y generadores, lo que comprometería tanto la durabilidad como la seguridad de los equipos y del personal.

Diferentes tipos de máquinas como motores eléctricos, transformadores y generadores, presentan requerimientos específicos de control de temperatura que se logra mediante diversos métodos de enfriamiento como la ventilación, el uso de radiadores y el enfriamiento por líquidos.

Para un control preciso, la implementación de sensores de temperatura en puntos estratégicos permite medir y monitorear continuamente las variaciones térmicas, lo cual ayuda a prevenir sobrecalentamientos y a optimizar el funcionamiento.

Los sistemas de control de temperatura pueden estructurarse en bucles abiertos y cerrados. En un bucle cerrado, por ejemplo, el sistema ajusta automáticamente el nivel de enfriamiento o reduce la carga cuando detecta un incremento de temperatura, permitiendo así una mayor precisión y desempeño. Además, con la integración de algoritmos avanzados, estos sistemas inteligentes pueden realizar ajustes automáticos y monitorear las condiciones de manera remota, lo cual simplifica la administración en plantas industriales y mejora el aprovechamiento de la energía.

Considerar las propiedades térmicas de los materiales, optimizar el consumo de energía y garantizar la seguridad en todos los componentes son aspectos fundamentales para los ingenieros eléctricos. En conjunto, estas prácticas aseguran un rendimiento óptimo y prolongan

la vida útil de los equipos industriales, estableciendo el control de temperatura como una función clave en la gestión y operación segura de los sistemas eléctricos industriales. Dado lo anterior puede concluirse que aprender a diseñar y analizar controles de temperatura se convierte en una competencia importante para los estudiantes de ingeniería eléctrica.

## **1.2 Formulación**

¿Cómo realizar un prototipo que permita el desarrollo de competencias en el estudiantado encaminadas al control de la variable temperatura?

## 2 Justificación

El control de temperaturas es un aspecto crítico para garantizar la eficiencia, durabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos e industriales. Dicho control resulta especialmente relevante en procesos donde el calor excesivo puede llevar a fallos en motores, transformadores y generadores, lo que comprometería tanto la durabilidad como la seguridad de los equipos y del personal. Sin embargo, cabe recalcar que el calor es un subproducto inevitable en la operación de equipos eléctricos como motores, transformadores, generadores, inversores y dispositivos de almacenamiento de energía.

Asimismo, aun teniendo un sistema de control de temperatura adecuado, el sobrecalentamiento puede llevar a fallas mecánicas, acortar la vida útil de los equipos y, en casos extremos, causar incendios o accidentes.

El control de temperatura, además de ser importante, tiene tres objetivos básicos: la protección de componentes, pues los dispositivos eléctricos y electrónicos tienen límites de temperatura específicos, y superarlos puede deteriorar los materiales y causar fallos prematuros; lo segundo es el buen rendimiento energético, ya que el sobrecalentamiento puede disminuir el desempeño de los equipos eléctricos al aumentar la resistencia y las pérdidas de energía; y por último, la seguridad, porque mantener la temperatura dentro de límites adecuados es esencial para evitar riesgos de incendio o explosiones, especialmente en equipos que operan con altas potencias.

De este modo, existen diversos métodos para gestionar la temperatura en los sistemas eléctricos como los sistemas de enfriamiento activo y pasivo, los sensores de temperatura, los sistemas de control en bucle abierto y cerrado, sistemas de control inteligente y monitoreo remoto, entre otros más.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta la diversidad de métodos, se hace necesario proporcionar al estudiantado herramientas educativas que le permitan aprender sobre estos procesos que gozan de gran relevancia en el campo eléctrico. Además, se pone de relieve los

problemas que podría traer un mal manejo de la variable temperatura, llegando a causar grandes daños, en este sentido proponer la creación de un módulo de experimentación para el control de temperatura también es un camino en la prevención de incidentes y apoya de manera directa los procesos académicos y laborales que vendrán con posterioridad.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Construir un módulo que permita la realización y simulación de prácticas de control de temperatura en lazo cerrado.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Analizar los diferentes procesos eléctricos que requieren control de temperatura para identificar las áreas clave que pueden ser automatizadas.

Diseñar un prototipo que incorpore un sistema de control automático para el control de temperatura.

Evaluar el comportamiento y desempeño del prototipo mediante pruebas experimentales, determinando su efectividad y su aplicabilidad.

Desarrollar una guía de prácticas y ejercicios para el sistema de control automático, facilitando el aprendizaje y la aplicación práctica de conceptos de control.

## 4 Marco teórico

Con el propósito de brindar la información necesaria y suficiente para el entendimiento del presente proyecto a continuación se hacen las definiciones pertinentes. En principio, se hace necesario definir la variable de temperatura, la cual es cualquier factor que puede tomar diferentes valores en función de las condiciones en un sistema dado.

### 4.1 Temperatura.

En el contexto de la física y la meteorología, la temperatura es una propiedad termodinámica que describe el nivel de calor o energía térmica en un objeto, sustancia o ambiente. En experimentos y modelos científicos, la temperatura puede ser tratada como una variable independiente o dependiente, dependiendo de su papel. Por ejemplo, sería una variable independiente en el caso de que se controle la temperatura en un experimento, como en un laboratorio, y se observe su efecto sobre otras variables.

En ese mismo sentido, sería una variable dependiente cuando la temperatura es el resultado de algún otro factor, como la presión, el volumen de gas o la cantidad de energía aplicada a un sistema. La temperatura se mide en diversas escalas, como grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Kelvin (K) y grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), y es una variable importante en muchas áreas de la ciencia, como la física, la química y la climatología.

Ahora bien, (Rodríguez, Oré y Vargas 2021) definen el término variable temperatura como un sistema o fenómeno cuyo valor de temperatura cambia de manera no constante a lo largo del tiempo o en diferentes condiciones (p.2). Dependiendo del contexto, puede tener varios significados, en el presente proyecto se puede decir que los sistemas con temperaturas variables son comunes, por ejemplo, en la gestión de la temperatura en procesos industriales o sistemas de refrigeración y calefacción.

Las variaciones de temperatura de un cuerpo van casi siempre acompañadas de una variación de las magnitudes observables o macroscópicas que caracterizan el estado de dicho cuerpo. Así ocurre, por ejemplo, con la longitud de una columna líquida o de un alambre, la resistencia eléctrica de un metal, la presión (o el volumen) de un gas a volumen (o presión) constante, etc.

## **4.2 Control de temperatura.**

El control de temperatura se puede realizar en varios tipos de sistemas, para brindar mayores claridades se exponen la siguiente información, sobre lazo abierto y lazo cerrado, recuperada de la página web Control automático educación. Un sistema en lazo cerrado toma la salida del proceso y la compara con la señal de referencia para conocer la evolución de la variable.

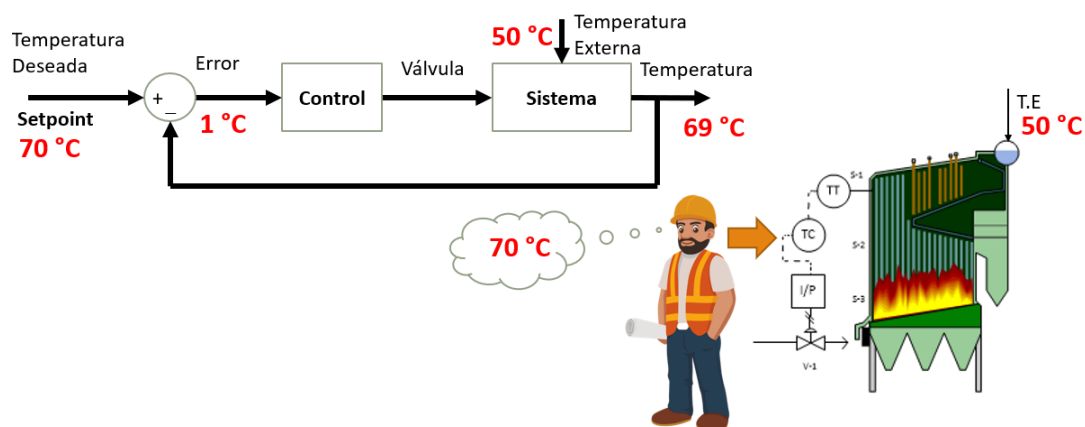
Por lo tanto, la diferencia entre un sistema de lazo abierto y lazo cerrado radica en el seguimiento constante de la variable que se desea controlar, el lazo abierto nunca sabe cómo la variable se comporta, mientras que el lazo cerrado conoce en todo momento la evolución de la variable. Un ejemplo de un sistema en bucle cerrado sería una tostadora automática que mide la temperatura, humedad y el nivel de sequedad de las tostadas, ajustando la temperatura.

Los sistemas de control de lazo cerrado son ampliamente utilizados en una variedad de industrias para regular y controlar procesos automatizados. Un sistema de control de lazo cerrado, también conocido como sistema de control de realimentación, utiliza una señal de retroalimentación para comparar el resultado deseado con el resultado actual y ajustar el proceso en consecuencia. Esto permite una mayor precisión y estabilidad en comparación con los sistemas de control de lazo abierto.

En un sistema en lazo cerrado se puede colocar un medidor y transmisor de temperatura que realimenta el sistema hacia el controlador y mantiene de esa forma la temperatura en su lugar deseado. Este valor deseado se conocerá como el Setpoint y será el único valor que será modificado por el operario. Estos sistemas de control son clasificados como sistemas con retroalimentación o feedback.

Un ejemplo típico de un sistema de control de lazo cerrado es un controlador PID, que es utilizado para controlar la temperatura en un horno o la velocidad de un motor eléctrico. El controlador PID utiliza un algoritmo matemático para calcular la diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura actual y ajusta el proceso en consecuencia para lograr una mayor precisión y estabilidad.

A continuación, en la figura 1, se ve el ejemplo de un sistema de control en lazo cerrado de la caldera, en esta estructura el controlador puede conocer en todo momento el valor de la temperatura y podrá actuar sobre la válvula siempre que sea necesario.



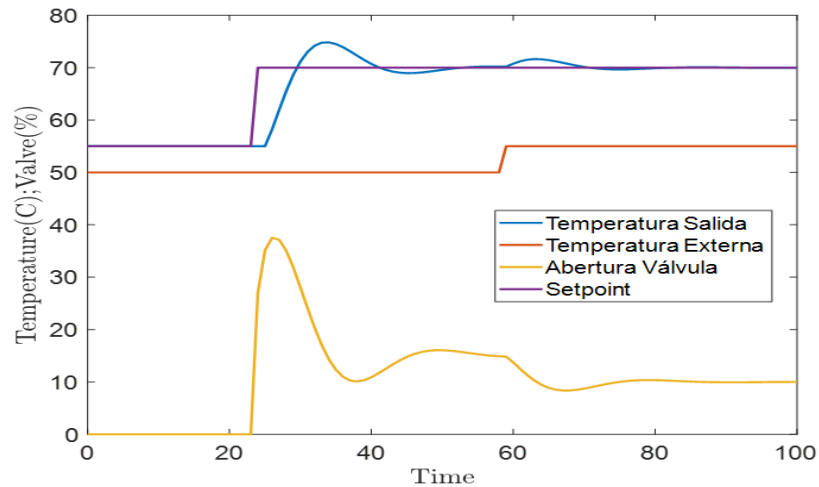
*Figura 1.* Ensayo y error para llevar el proceso de la temperatura.

Fuente: <https://controlautomaticoeducacion.com/>

Se puede observar que el valor medido por el sensor sobre la temperatura es llevado a un comparador (o sea, se realiza una resta entre el setpoint y el valor de temperatura leído) esto genera un error, el cual entra al controlador y con base a ese error el controlador sabrá si debe abrir o cerrar la válvula con el objetivo siempre de volver cero dichos errores.

Analizando la respuesta del sistema, se puede ver que el controlador lleva la temperatura a la referencia y que el operador en este caso no necesita estar pendiente en todo momento del proceso, incluso, en el minuto 60 cuando sucede la perturbación, se nota que el controlador se

percata de esto y comienza a cerrar la válvula para traer nuevamente la temperatura hacia la referencia, como se ve en la figura 2.



*Figura 2.* Problemas cuando el operario no está en el proceso.

Fuente: <https://controlautomaticoeducacion.com/>

Con esto se puede concluir que el sistema en lazo cerrado mejora los problemas del lazo abierto y consigue mantener las variables dentro de la zona de operación y consigue rechazar los posibles disturbios. El precio que pagar en este sistema es que los controles en lazo cerrado tienden a hacer oscilar al sistema consiguiendo inclusive inestabilizar el proceso. O sea, puede traer problemas de estabilidad al intentar corregir los errores de las variables con relación al setpoint. Por lo tanto, su ajuste y diseño serán cruciales para evitar este problema.

En un sistema de control en lazo cerrado, la función de transferencia es esencial para analizar cómo se comporta el sistema ante diferentes entradas y perturbaciones. Para una comprensión más profunda de cómo se determina y utiliza la función de transferencia en sistemas de control

Los sistemas de lazo cerrado son ampliamente utilizados en industrias que requieren un alto grado de precisión y estabilidad. Algunas aplicaciones industriales incluyen: control de temperatura en hornos industriales, regulación de velocidad en motores eléctricos y control de

nivel en tanques de almacenamiento de líquidos. Estos sistemas permiten un control preciso y automático, ajustando continuamente las entradas en respuesta a las salidas monitoreadas.

### 4.3 Controlador PID

Los controladores PID (proporcional-integral-derivativo) son componentes fundamentales de los sistemas de automatización y control actuales. Los PID utilizan un mecanismo de control de retroalimentación en bucle cerrado que ajusta continuamente las salidas en función de la diferencia entre un punto de ajuste deseado y el valor medido.

Los controladores PID representan un mecanismo de retroalimentación sofisticado y vital para controlar sistemas dinámicos. En su núcleo, operan utilizando tres términos básicos: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). Cada término modula de manera única la señal de salida en función de la diferencia entre el punto de ajuste deseado y el valor medido real, comúnmente conocido como el error. (ver figura 3)

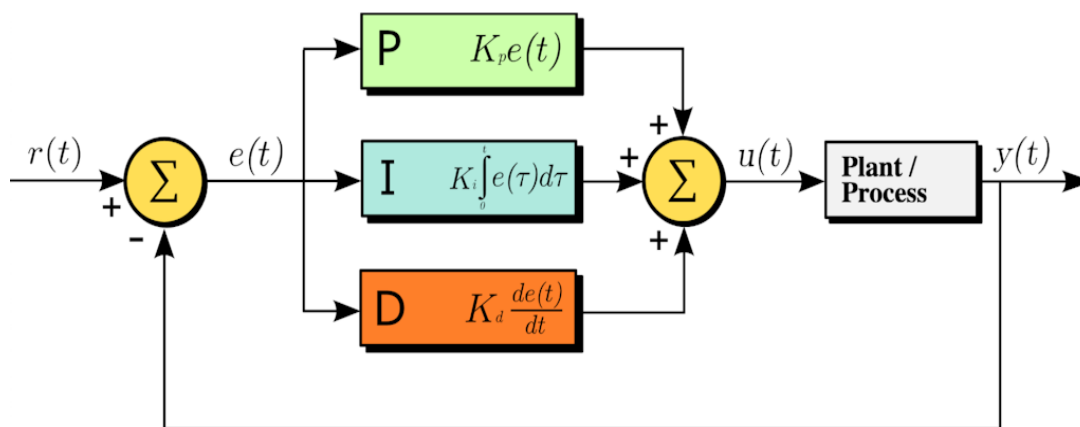


Figura 3. PID Block Diagram, Arturo Urquiza.

Fuente: Wikimedia Commons.

El término Proporcional (P) responde al error presente, generando una salida proporcional a su magnitud. Al aplicar una acción correctiva inmediata, el término P minimiza rápidamente los errores

El término Integral (I) aborda cualquier error persistente o desviaciones a largo plazo del punto de ajuste acumulando el error a lo largo del tiempo. Al integrar la señal de error, el término I asegura que el sistema se acerque y mantenga el punto de ajuste con precisión, eliminando los errores en estado estacionario.

El término Derivativo (D) anticipa cambios futuros en el error evaluando su tasa de cambio. Este enfoque amortigua las oscilaciones y estabiliza el sistema, especialmente durante las respuestas transitorias.

Un controlador PID calcula continuamente una señal de error como la diferencia entre un punto de ajuste deseado (el valor objetivo) y la variable de proceso actual (el valor medido). Con base en esta señal de error el controlador ajusta la entrada de control del sistema para minimizar el error y mantener la variable de proceso cerca del punto de ajuste.

Para entender de manera más detallada el funcionamiento es necesario remitirse a la siguiente información: Cálculo del Error: El controlador PID calcula continuamente la señal de error como la diferencia entre el punto de ajuste deseado y la variable de proceso actual. Control Proporcional: El término proporcional (P) responde al error actual produciendo una salida proporcional a la magnitud del error. Control Integral: El término integral (I) responde a la suma acumulada de errores pasados y busca eliminar cualquier error en estado estacionario. Se calcula como la integral del error a lo largo del tiempo. Control Derivativo: El término derivativo (D) responde a la tasa de cambio del error y ayuda a amortiguar los cambios rápidos en el sistema. Se calcula como la derivada del error a lo largo del tiempo. Salida de Control: La salida de control es la suma de los términos proporcional, integral y derivativo.

El ajuste de la Entrada de Control: La salida de control se aplica como la entrada al sistema que se está controlando. Ajusta parámetros del sistema como posiciones de válvulas, velocidades de motores o elementos de calefacción para acercar la variable de proceso al punto de ajuste. El bucle de Retroalimentación: La variable de proceso se mide continuamente y se retroalimenta al controlador, cerrando el bucle de control. El controlador ajusta la entrada de

control basada en la retroalimentación, con el objetivo de minimizar el error y mantener la variable de proceso en el punto de ajuste.

Los controladores PID están disponibles como instrumentos dedicados, como se muestra a continuación. Sin embargo, comúnmente se integran con Controladores Lógicos Programables (PLC) en sistemas de automatización y control industrial. Los PLC son dispositivos programables que controlan y monitorean procesos industriales, mientras que los controladores PID son algoritmos de control especializados diseñados para regular variables de proceso específicas.

Además de la integración con los sistemas PLC y SCADA, los controladores PID a veces se implementan en microcontroladores y sistemas embebidos, donde se necesita control en tiempo real, pero un PLC sería excesivo. Los algoritmos PID pueden controlar dispositivos como motores, calentadores o sensores directamente. Los controladores PID se utilizan en sistemas de bucle cerrado donde se requiere un control preciso de los procesos. Algunas de las principales aplicaciones se expresan a continuación. Los controladores PID se utilizan ampliamente para regular la temperatura, incluyendo sistemas de calefacción, refrigeración y HVAC, donde ayudan a mantener temperaturas precisas en entornos como procesos industriales, edificios y sistemas de control climático.

Los controladores PID son fundamentales en la automatización industrial para controlar parámetros como presión, caudal, nivel y pH en procesos de manufactura como el procesamiento químico, el tratamiento de agua y la producción de alimentos. En sistemas de robótica y control de movimiento, los controladores PID regulan la velocidad del motor, la posición y el par, asegurando un movimiento suave y preciso en aplicaciones como máquinas CNC, brazos robóticos y vehículos guiados automatizados (AGV).

Diversas aplicaciones de control de procesos utilizan controladores PID para regular la presión, el nivel y la composición en sistemas como refinerías de petróleo, plantas de energía y plantas de tratamiento de aguas residuales. Las aplicaciones electrónicas utilizan controladores PID para tareas como la regulación de voltaje, el control de motores y la conversión de energía

en aplicaciones que van desde fuentes de alimentación hasta controladores de motores. Los sistemas automotrices emplean controladores PID para el control del motor, el control de cruce, los sistemas de frenos antibloqueo y el control de transmisión automática, optimizando la seguridad, la eficiencia del combustible, las emisiones y el rendimiento del vehículo.

En la automatización agrícola los controladores PID se utilizan para el control del clima en invernaderos, la gestión del riego y los sistemas de alimentación del ganado, asegurando condiciones óptimas de crecimiento y utilización de recursos. Los controladores PID se utilizan en ingeniería biomédica y numerosos dispositivos médicos para administrar medicamentos, regular la temperatura del paciente y controlar la glucosa en sangre en bombas de insulina, incubadoras y máquinas de anestesia. Los controladores PID se utilizan en sistemas de energía renovable, como la energía solar y las turbinas eólicas, donde optimizan y regulan los voltajes.

#### **4.4 Modelado de sistemas.**

El presente apartado se basa en el estudio de Ojeda-Misses (2022), según este autor, los sistemas térmicos generalmente involucran la transferencia de calor mediante la propagación de calor en diversos medios donde existe un gradiente térmico cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto.

Generalmente, dichos sistemas se analizan en términos de resistencia y de capacitancia térmica considerando que no se presentan con precisión como elementos de parámetros concentrados, calefacción mediante un mezclador usando la resistencia y la capacitancia térmica, que permiten el control de temperatura del líquido que entra considerando la masa, la velocidad de flujo del líquido y la entrada de flujo de calor. (p. 160)

Entre los trabajos actuales y relevantes respecto al control de temperatura se ponen en consideración los siguientes: en Salcedo, Rivas y Sotomayor (2018) los autores realizan el control predictivo generalizado de temperatura de clinkerización en un horno rotativo de cemento. En Benítez, Rivas, Feliu y Sánchez (2016), se presenta el control de temperatura bajo ganancias difusas de hornos para el recalentamiento de losas para la industria. En Gonzalez,

Perez, Batlle & Garcia (2015), se presenta el control bajo un predictor de Smith donde se controla la temperatura durante la formulación de medicamentos inyectables en reactores.

En Santos, Ancines, & Krenzinger (2018), se presenta el control de temperatura de unos paneles solares. Mientras tanto, en Villar, de la Cal & Sedano (2008), se presenta el control de temperatura para reducir el consumo de energía basado en un controlador difuso que fomenta la sustentabilidad. Finalmente, en Torres, Araujo, Menezes & Costa Junior (2017), se presenta el modelado matemático y el control de temperatura para una planta térmica mediante un PID.

En lo que respecta a la ley de enfriamiento de Newton, que estudia la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente, no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo. Finalmente, en Rezende & Bacigalupe (2015), se estudia la termorregulación y la adaptación a la temperatura en las libélulas, donde se analiza si son capaces de mantener su temperatura corporal constante ante la temperatura del medio ambiente y se relaciona dicho efecto con la ley de enfriamiento de Newton.

#### **4.5 Herramientas para simulación y control.**

MATLAB, cuyo nombre proviene de "Matrix Laboratory", es una plataforma de programación especialmente diseñada para cálculos numéricos y análisis de datos. Creado en sus inicios para resolver problemas de álgebra lineal mediante el uso de matrices, actualmente MATLAB ha evolucionado para cubrir una amplia gama de aplicaciones en distintas áreas técnicas y científicas. Este entorno cuenta con un lenguaje de programación propio, también llamado MATLAB, que permite realizar cálculos complejos de forma eficaz y desarrollar proyectos que abarcan desde la simple manipulación de datos hasta la creación de algoritmos sofisticados. Gracias a su enfoque en el manejo de matrices, MATLAB facilita la realización de operaciones matemáticas avanzadas y ofrece una serie de herramientas visuales que permiten representar los resultados de manera clara y accesible.

En MATLAB, el usuario no solo trabaja con números o ecuaciones, sino que también puede visualizar gráficamente los datos, hacer simulaciones y construir modelos. Todo esto se realiza en un entorno de desarrollo integrado (IDE), que permite organizar y gestionar cada proyecto de forma ordenada y eficiente. Además, MATLAB cuenta con una extensa librería de funciones conocidas como toolboxes, cada una de ellas orientada a un área de aplicación específica, como la estadística, el procesamiento de imágenes o la inteligencia artificial.

MATLAB es una herramienta poderosa que encuentra su utilidad en una amplia variedad de campos y aplicaciones. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos avanzados de manera eficiente hace que MATLAB sea una opción preferida en entornos académicos, de investigación y de desarrollo industrial. A continuación, se exploran algunas de las áreas en las que MATLAB es comúnmente utilizado en investigación científica: MATLAB es ampliamente utilizado en el ámbito de la investigación por su capacidad para desarrollar y probar algoritmos complejos. Su versatilidad lo convierte en una herramienta ideal para crear simulaciones y modelos matemáticos que permiten entender mejor fenómenos naturales y procesos físicos.

También es utilizado en ingeniería: Los ingenieros utilizan MATLAB para analizar y simular sistemas en diversas ramas, como la ingeniería eléctrica, mecánica, civil y aeroespacial. MATLAB permite diseñar y simular sistemas de control, realizar cálculos estructurales y modelar procesos industriales.

Para el procesamiento de datos: MATLAB se utiliza ampliamente en la ciencia de datos y el análisis estadístico, ya que permite procesar y analizar grandes conjuntos de datos con rapidez y precisión. Desde el filtrado de datos hasta el análisis predictivo, MATLAB proporciona herramientas avanzadas que facilitan la obtención de información valiosa. Un caso especial es la inteligencia artificial y aprendizaje automático: MATLAB cuenta con toolboxes especializadas para el desarrollo de modelos de aprendizaje automático y redes neuronales, lo cual permite a los usuarios construir algoritmos de IA personalizados y entrenarlos con datos específicos. Esto es útil en aplicaciones de reconocimiento de patrones, procesamiento de imágenes y predicción de datos.

En desarrollo de software: MATLAB permite crear aplicaciones científicas y técnicas con interfaces gráficas de usuario (GUI). Esto facilita a los investigadores y desarrolladores construir programas personalizados que otros usuarios pueden utilizar para realizar cálculos o simulaciones sin necesidad de escribir código. MATLAB se adapta así a múltiples necesidades y ofrece una plataforma integral para quienes buscan una solución completa y flexible para proyectos de cálculo, simulación y análisis de datos avanzados.

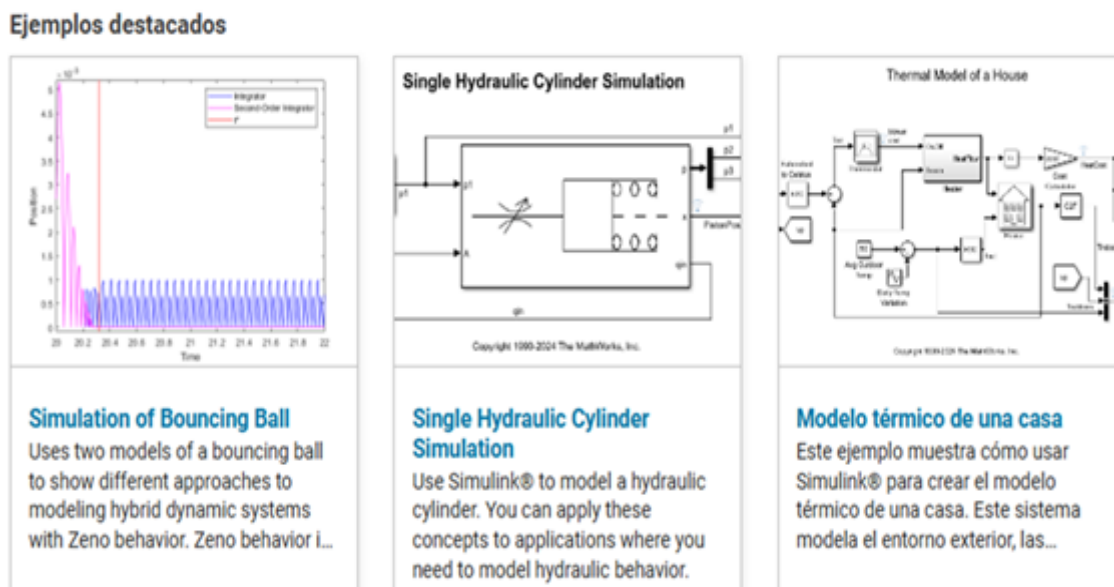


Figura 4. Funcionamiento de la plataforma *Simulink*.

Fuente: Mathworks.

Por otro lado, *Simulink* Ofrece soporte para el diseño en nivel de sistema, la simulación, la generación automática de código, y las pruebas y verificación continuas de sistemas embebidos. *Simulink* proporciona un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en modelos y exportar los resultados de simulación a MATLAB para posterior análisis. *Simulink*® permite modelar y simular una amplia gama de sistemas dinámicos, como se observa en la figura 4.

Cuadro 1: Simulación de pelota que rebota. Utiliza dos modelos de una pelota que rebota para mostrar diferentes enfoques para modelar sistemas dinámicos híbridos.

Cuadro 2: Simulación de un solo cilindro hidráulico. Se utiliza *Simulink*® para modelar un cilindro hidráulico. Puede aplicar estos conceptos a aplicaciones en las que necesite modelar el comportamiento hidráulico. *Simulink* permite modelar y simular una amplia gama de sistemas de automoción. Puede modelar y simular el vehículo y el entorno, y desarrollar algoritmos de control para aplicaciones de automoción.

Cuadro 3. Aplicaciones en el sector aeroespacial. Cuando modelice sistemas aeroespaciales en el entorno de *Simulink*, puede utilizar Aerospace Blockset. Aerospace Blockset amplía *Simulink* y permite modelar, simular y analizar la dinámica de vehículos del sector aeroespacial. Puede incorporar la dinámica de vehículos, validar los modelos del entorno de vuelo, modelar el comportamiento del piloto y conectar un modelo al simulador de vuelo FlightGear.

Por otro lado, Powertrain Blockset ofrece modelos de aplicación de referencia totalmente ensamblados de sistemas de propulsión de automóviles, incluidos los sistemas de gasolina, diésel, híbridos y eléctricos. Vehicle Dynamics Blockset ofrece modelos de aplicación de referencia totalmente ensamblados que simulan las maniobras de conducción en un entorno en 3D. Model-Based Calibration Toolbox ofrece apps y herramientas de diseño para calibrar motores complejos y subsistemas de la cadena cinemática de forma óptima.

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlas en una salida (activar un motor, encender un LED, publicar algo en línea). Se puede indicar a la placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para ello, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring ) y el software Arduino (IDE) , basado en Processing microcontrolador de la placa. Para ello, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring ).

Arduino se ha utilizado en miles de proyectos y aplicaciones diferentes. El software de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible para usuarios avanzados. Funciona en Mac, Windows y Linux. Los profesores y estudiantes lo utilizan para construir instrumentos científicos de bajo coste, para demostrar principios de química y física o

para iniciarse en la programación y la robótica. Los diseñadores y arquitectos construyen prototipos interactivos, los músicos y artistas lo utilizan para instalaciones y para experimentar con nuevos instrumentos musicales.

Arduino también simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores, pero ofrece algunas ventajas para profesores, estudiantes y aficionados interesados en comparación con otros sistemas: económico: las placas Arduino son relativamente económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores. Multiplataforma: el software Arduino (IDE) funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.

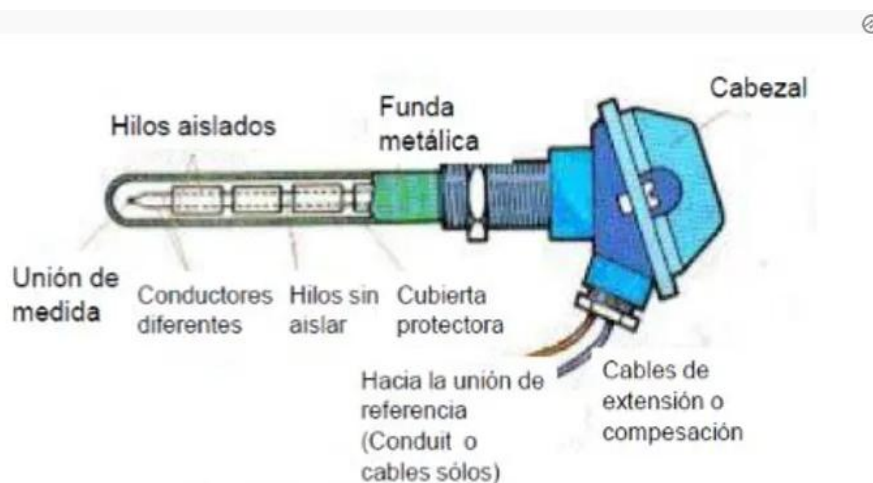
El entorno de programación simple y claro del software Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible para que los usuarios avanzados también puedan aprovecharlo. Para los profesores, está basado en el entorno de programación Processing, Software de código abierto y extensible: el software de Arduino se publica como herramientas de código abierto, disponibles para que lo extiendan programadores experimentados, mediante bibliotecas de C++.

El hardware extensible y de código abierto con planos de las placas Arduino publicados bajo una licencia Creative Commons, por lo que los diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo y mejorándolo. Incluso los usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión del módulo en placa de pruebas para entender cómo funciona y ahorrar dinero.

#### **4.6 Sensores de temperatura.**

Los sensores de temperatura son dispositivos fundamentales en diversas aplicaciones industriales y domésticas que requieren monitoreo y control preciso de la temperatura. Estos sensores permiten medir y detectar cambios en la temperatura de forma rápida y precisa, lo que resulta esencial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de muchos procesos y sistemas.

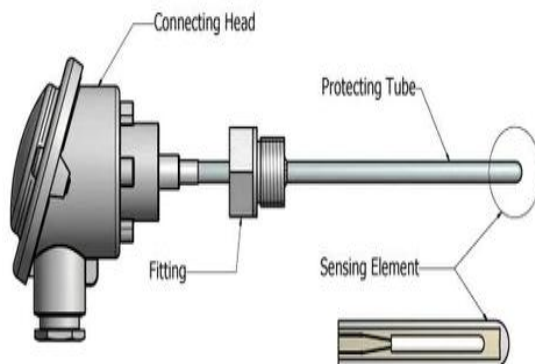
Los termopares son sensores de temperatura muy utilizados debido a su amplio rango de medición y su capacidad para resistir condiciones extremas. (ver figura 5)



*Figura 5.* Termopar con sus accesorios de protección y transmisión.  
Fuente: Wikipedia.

Estos sensores están compuestos por dos metales diferentes que generan una pequeña corriente eléctrica en respuesta a cambios de temperatura. La diferencia de voltaje producida se mide y se convierte en una lectura de temperatura.

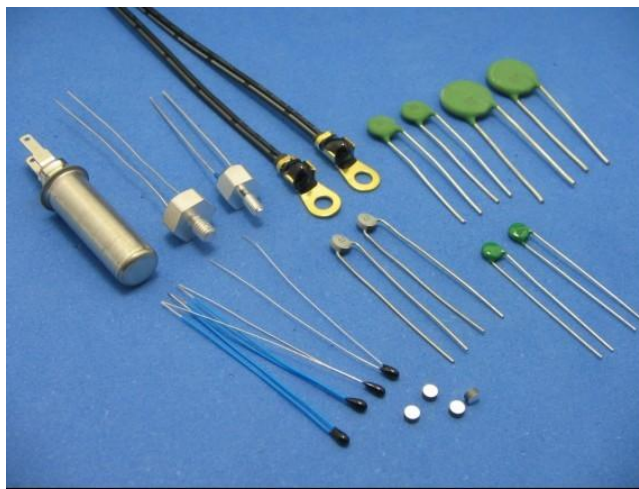
Las resistencias de temperatura (RTD) son sensores que se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor metálico con respecto a los cambios de temperatura.



*Figura 6.* Resistencia de temperatura RTD con termo pozo.  
Fuente: Wikipedia.

Par las RTD, como la de la figura 6, el material más comúnmente utilizado es el platino, que exhibe una resistencia lineal con la temperatura. Las RTD ofrecen una alta precisión y estabilidad, pero suelen ser más costosas que otros tipos de sensores.

Los termistores son dispositivos que utilizan materiales semiconductores cuya resistencia eléctrica varía significativamente con los cambios de temperatura. Existen dos tipos principales de termistores: positivos y negativos, como los presentados en la figura 7.



*Figura 7.* Termistores de diferentes tipos y encapsulados.  
Fuente: Wikipedia.

Los termistores negativos (NTC) presentan una disminución en la resistencia a medida que aumenta la temperatura, mientras que los termistores positivos (PTC) muestran un aumento en la resistencia con el aumento de la temperatura.

Finalmente, con los conceptos y procedimientos abordados a lo largo de esta sección resulta más clara la lectura del proyecto en su globalidad, pues los temas han sido definidos con la precisión necesaria para proporcionar la información requerida.

## 5 Metodología

### 5.1 Tipo de proyecto

El proyecto se inscribe dentro de la investigación aplicada que según Nieto (2018), Está orientado a resolver los problemas que se presentan en los procesos de producción, distribución, circulación, y consumo de bienes y servicios de cualquier actividad humana. Se denomina aplicadas; porque en base a investigación básica, pura o fundamental en las ciencias fácticas o formales se formulan problemas o hipótesis de trabajo para resolver los problemas de la vida productiva de la sociedad. Se llama también tecnológico, porque su producto no es un conocimiento puro, sino tecnológico. (p. 3)

Por otro lado, el mismo autor apunta que esta clase de investigación tiene como objetivo mejorar u optimizar los procesos, por lo cual trasciende los valores de verdad o mentira y se ubica en categorías de eficiencia o deficiencia.

Como se mencionó al principio del documento, la intención del proyecto consiste en construir un módulo que permita la realización y simulación de prácticas de control de temperatura en lazo cerrado, en este sentido se inscribe dentro del tipo de investigación aplicada o tecnológica, porque promueve la mejora en el funcionamiento de procesos, en este caso el control de temperatura en lazo cerrado.

### 5.2 Método

En concordancia con los fines el proyecto se utiliza el método experimental, pues este surge como resultado del avance técnico y del conocimiento, producto del esfuerzo humano por entender y transformar lo desconocido. (Chagoya, 2008, p.6). Además, se caracteriza por el estudio de un objeto en condiciones controladas creadas por el investigador, en este caso, a través de experimentos.

En principio, se analizan los diferentes procesos eléctricos que requieren control de temperatura para identificar las áreas clave que pueden ser automatizadas. Para este fin se realizan consultas, búsquedas y observaciones detalladas de los procesos involucrados.

Posteriormente, se pasa al diseño de un prototipo que incorpore un sistema de control automático para el control de temperatura. En este punto es necesario basarse en páginas web que ya han trabajado con estos prototipos, con esta ayuda se ejecutará el diseño para el proyecto.

Luego, sigue la evaluación del comportamiento y desempeño del prototipo mediante pruebas experimentales, determinando su efectividad y su aplicabilidad. En este apartado se tendrá en cuenta todo el proceso anterior y las nuevas necesidades que surjan para finiquitar los detalles pertinentes, evaluando si cumple con el objetivo para el cual fue creado y que sea accesible.

Finalmente, se propone desarrollar una guía de prácticas y ejercicios para el sistema de control automático, facilitando el aprendizaje y la aplicación práctica de conceptos de control, con el fin de brindar la información adicional y promover el contenido pedagógico y experimental que ha sido creado.

Con los pasos que han sido descritos se pretende llegar al objetivo general, que consiste en construir un módulo que permita la realización y simulación de prácticas de control de temperatura en lazo cerrado.

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

La recolección de información se ha basado en artículos, páginas web, libros especializados y material educativo encontrado en internet y plataformas educativas. Estos insumos han sido de gran ayuda para la propuesta del presente proyecto, pues brindan la información y los ejemplos necesarios para la construcción del diseño.

**5.3.1 Fuentes primarias.** Libros, revistas científicas, documentos oficiales o informes técnicos y de investigación

**5.3.2 Fuentes secundarias.** Enciclopedias, diccionarios, antologías, síntesis y resúmenes.

## 6 Resultados

El proyecto contempla su realización, empezando por el modelo del sistema para un primer nivel simulación para entender cómo la bombilla cambia su temperatura cuando se enciende y se apaga, usando solo los datos que se obtuvieron al medir la temperatura. No se tuvo en cuenta la física detrás de todo, solo los datos. Después de revisar los datos, se cae en cuenta de que el comportamiento térmico de la bombilla es bastante simple, como un sistema de primer orden, similar a lo que pasa en un circuito eléctrico.

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Aquí,  $K$  es la ganancia (qué tan grande es el cambio de temperatura) y  $\tau$  es el tiempo que tarda la bombilla en cambiar de temperatura. La entrada es el porcentaje de tiempo que la bombilla está encendida (ciclo de trabajo) y la salida es el cambio de temperatura con respecto a la temperatura ambiente.

Para encontrar los valores de  $K$  y  $\tau$ , se miran los datos. Se sabe que la temperatura ambiente está alrededor de  $18.5^{\circ}\text{C}$  y la temperatura máxima de la bombilla es de unos  $102^{\circ}\text{C}$ , así que la ganancia  $K$  es aproximadamente  $83.5^{\circ}\text{C}$ . Además, el tiempo que tarda en alcanzar el 63% de ese cambio en la temperatura es de unos 66 segundos, lo que da la constante de tiempo. Con estos datos, el modelo que se obtuvo fue:

$$P(s) = \frac{\Delta T(s)}{D(s)} = \frac{83.5}{66s + 1} \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

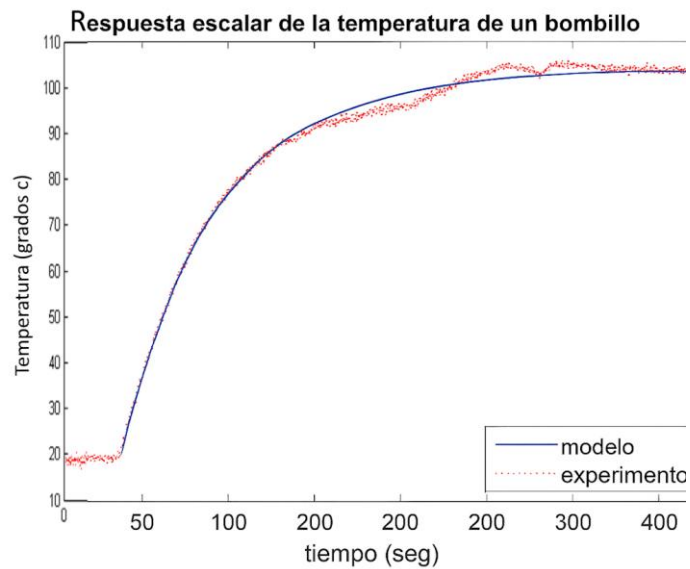
Después de eso, se prueba el modelo en MATLAB para ver qué tan bien coincide con los datos que se habían medido. Al hacerlo, se vio que el modelo de primer orden funciona bastante bien para describir cómo cambia la temperatura de la bombilla. Para tal fin se utilizó el código propuesto por University of Michigan (2019).

```

s = tf('s')           %variable en el dominio de la frecuencia.
To = 18.5;            % temperatura ambiente inicial
K = 83.5;            % ganancia
tau = 66;            % constante de tiempo
P = K/(tau*s+1);     % función de transferencia del modelo
[y,t] = step(P,350); % respuesta al escalón
plot(t+50,y+To);
hold
plot(temp,'r:')
xlabel('time (sec)')
ylabel('temperature (degrees C)')
title('Lightbulb Temperature Step Response')
legend('model','experiment','Location','SouthEast')

```

Tras la ejecución del código se obtuvo la curva que muestra la figura 8, en la que se observa el crecimiento de la temperatura a nivel de la simulación con la línea azul y del experimento con una fuente de 12 VDC y una lámpara en la línea roja



*Figura 8.* Temperatura de bombilla respuesta.

Fuente: propia.

Este modelo ayuda a entender cómo controlar la temperatura de la bombilla de manera más eficiente, y puede servir para diseñar sistemas de control como los métodos ON/OFF, P (proporcional), o PI (proporcional-integral).

Tras la revisión de los diferentes elementos eléctricos que se requieren para la identificación del sistema de control de temperatura, se estableció que se usará una lógica que encienda la bombilla cuando la temperatura medida sea más baja que la deseada y la apague cuando sea más alta. Sin embargo, se quiere entender el comportamiento de nuestro sistema de control y diseñarlo de manera más inteligente, por lo que se creará un modelo basado en la respuesta observada de la bombilla, conocido como modelo de "caja negra" o modelo basado en datos.

Para el Hardware, se utilizará una bombilla incandescente estándar de 25 W para mantener la temperatura dentro de los límites del sensor de temperatura elegido. El sensor de temperatura que se utilizará es el TMP36, que mide en grados Celsius, es barato, preciso y fácil de usar. El sensor se conecta a la placa Arduino, y la señal se lee en una de sus entradas analógicas.

Para encender y apagar la bombilla, se emplea un relé de estado sólido, que funciona como un interruptor eléctrico controlado por una señal DC de baja potencia (5 V) proveniente del Arduino. Este relé debe ser capaz de manejar la corriente alterna de 120 V en América del Norte, y el relé debe instalarse en el cable neutral de la bombilla, asegurándose de que el dispositivo esté apagado antes de manipularlo para evitar riesgos eléctricos.

Para este fin se realizan consultas, búsquedas y observaciones detalladas de los procesos involucrados, como lo es el control on / off, tras lo cual se tiene un modelo, se pueden probar diferentes formas de control. Primero, se usa un control ON/OFF simple: si la temperatura es menor a la deseada ( $75^{\circ}\text{C}$ ), la bombilla se enciende; si es mayor, se apaga. Este sistema usa retroalimentación, pero no necesita conocer el modelo exacto de la bombilla.

En la práctica, esto hace que la bombilla se encienda y apague constantemente, lo que causa parpadeo y puede reducir su vida útil. Aunque el control mantiene la temperatura cerca del valor deseado, no es muy eficiente en energía. Para mejorar esto, se puede probar otras estrategias que

reduzcan el parpadeo y hagan el sistema más estable. Este control es bastante efectivo porque mantiene la temperatura de la bombilla cerca del nivel deseado y no requiere mucho conocimiento para diseñarlo e implementarlo. Esto tiene algunas desventajas, como acortar la vida útil de la bombilla y no ser muy eficiente en el uso de energía, que es un problema común en los sistemas de control ON/OFF, siendo necesario reducir el parpadeo en la temperatura.

Una forma de reducir el parpadeo en la temperatura es usar un filtro pasa bajo como el de la figura 9, en la medición. En este caso, se usa un filtro de primer orden con un tiempo constante de 2 segundos, lo que ayuda a suavizar la señal de temperatura. Básicamente, el filtro toma los valores medidos y los promedia con los anteriores, evitando cambios bruscos.

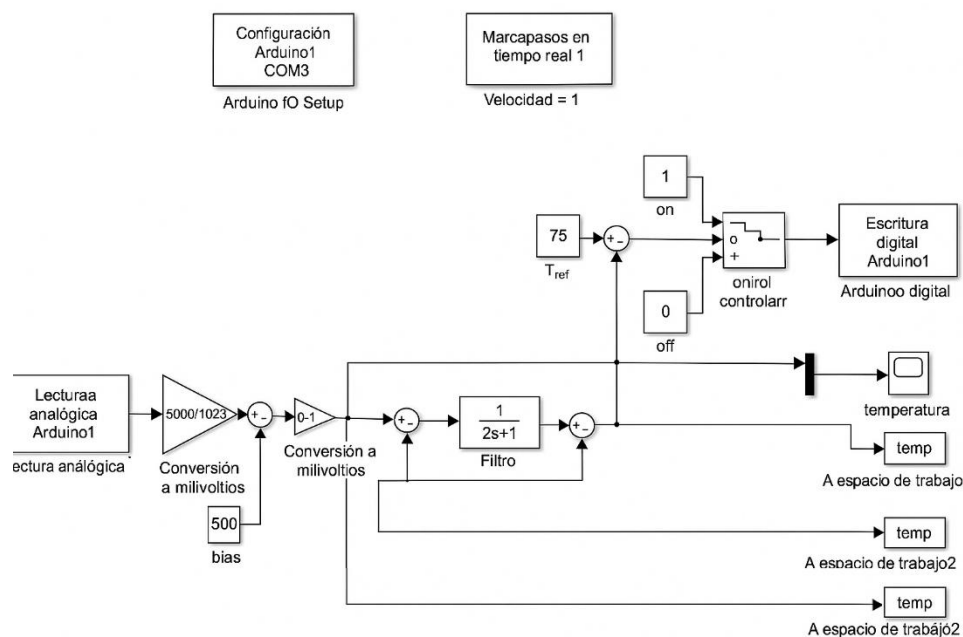
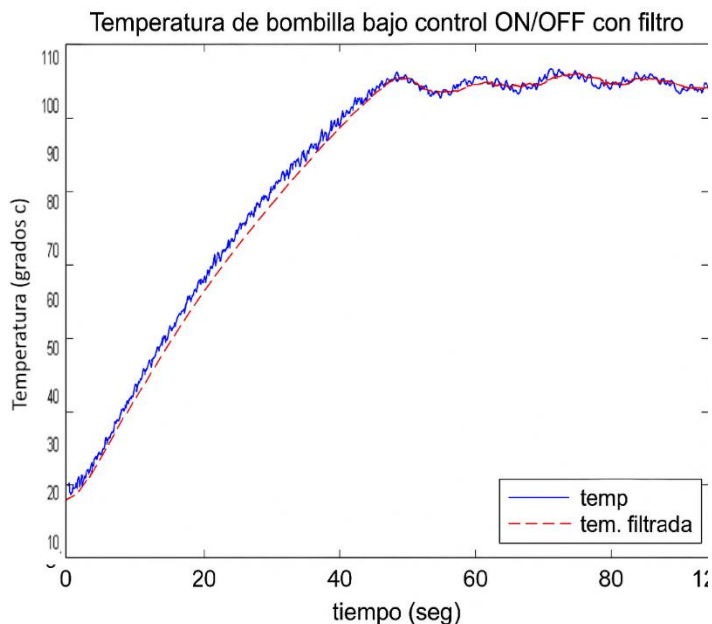


Figura 9. MATLAB ON OFF con filtro pasa bajo.

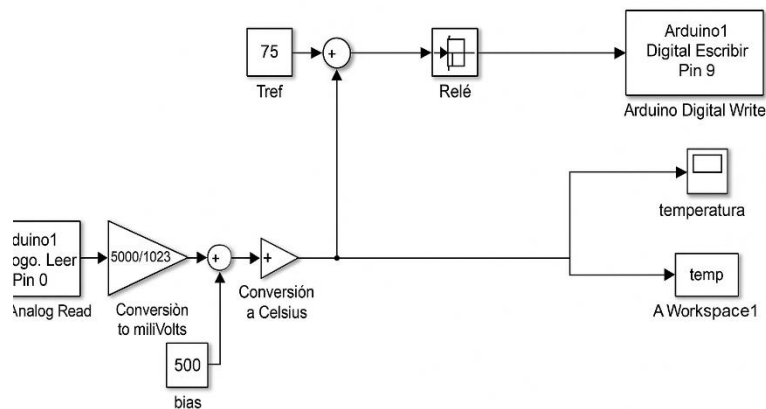
Fuente: propia

Este filtro no solo reduce el ruido en la medición, sino que también disminuye la frecuencia con la que la bombilla se enciende y apaga, lo que puede mejorar su vida útil y rendimiento. Sin embargo, esto hace que la temperatura no se mantenga tan cercana al valor deseado. Esto pasa porque el filtro retrasa la respuesta: la bombilla no se apaga ni se enciende inmediatamente al llegar al umbral, sino que el promedio de varias mediciones debe cruzarlo primero, como se observa en la figura 10.



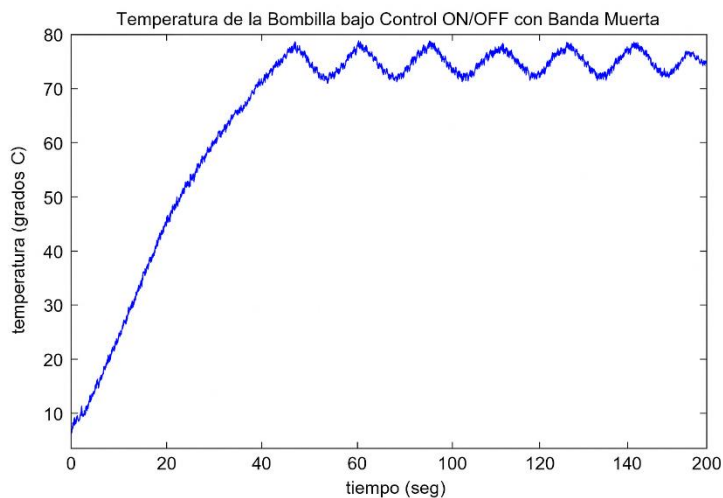
*Figura 10.* Temperatura bombilla ON/OFF con filtro pasa bajo.  
Fuente: propia

Otra estrategia es la aplicación de una banda muerta como la de la figura 11, lo cual significa que la bombilla no se enciende ni se apaga justo al alcanzar la temperatura deseada, sino que hay un pequeño margen. En este caso, la bombilla se apaga si la temperatura sube 2 grados por encima del objetivo (77°C) y se enciende cuando baja 2 grados por debajo (73°C). Esto evita cambios muy seguidos y hace que el sistema sea más estable.



*Figura 11.* Filtrado con banda muerta.  
Fuente: propia.

El resultado muestra que el comportamiento es similar al del filtrado con pasa bajo, ajustando el tamaño de la banda muerta, se puede controlar la frecuencia con la que la bombilla se enciende y apaga, así como qué tan cerca se mantiene de la temperatura deseada. (ver figura 12)



*Figura 12.* Temperatura bombilla ON/OFF con banda muerta.

Fuente: propia.

Para este fin se realizan observaciones detalladas de los procesos involucrados, en este caso una opción más avanzada es ajustar la intensidad de la bombilla según la magnitud del error: si está muy fría, se enciende más brillante; si el error es pequeño, con menos intensidad. Esto se llama Control Proporcional (P Control) y se expresa como:  $\text{control} = K_p * \text{error}$ .

Aunque este método no mejora mucho el rendimiento comparado con el ON/OFF, es útil para entender mejor el control P y PI en otros sistemas. En este sistema, la bombilla solo puede estar encendida o apagada, por lo que no se puede regular su intensidad directamente. Para simular un control proporcional (P Control), se usa modulación por ancho de pulso (PWM), que consiste en una señal cuadrada que alterna entre 1 y 0 con un período fijo. La intensidad del control se ajusta cambiando el ciclo de trabajo, es decir, el porcentaje de tiempo en "ON".

Si el período del PWM fuera muy largo, la temperatura subiría y bajaría en ciclos largos. Sin embargo, al hacer el período pequeño (frecuencia alta), se logra un efecto más suave en la temperatura. El modelo de la figura 13 implementa este control usando un bloque Analog Write,

que representa el ciclo de trabajo como un número de 0 a 255 (donde 0 es 0% y 255 es 100%). Para evitar valores fuera de este rango, se usa un bloque de saturación. La señal PWM se envía por el Pin Digital 9 del Arduino, identificado con el símbolo "~".

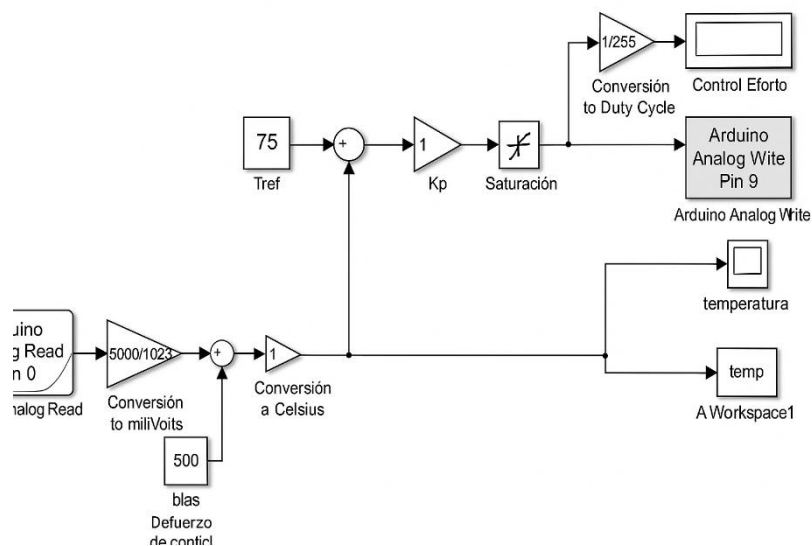


Figura 13. MATLAB control progresivo.  
Fuente: propia.

Se empieza con una ganancia proporcional de  $K_p=1$ . La figura 14 muestra que la temperatura tiene un error en estado estacionario considerable en comparación con la referencia de  $75^{\circ}\text{C}$ .

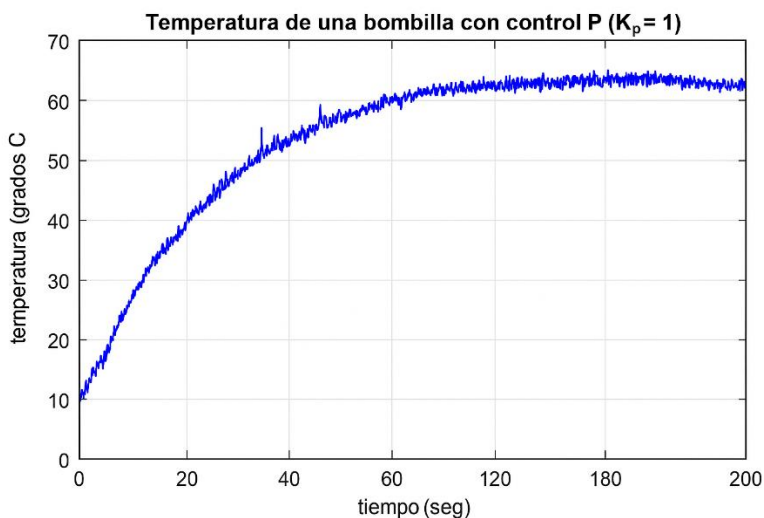


Figura 14. Bombilla bajo control proporcional.  
Fuente: propia.

Aunque el sistema de lazo cerrado tiene una ganancia DC cercana a 1, el error en estado estacionario sigue siendo mayor de lo esperado. Factores como cambios en el ambiente o en la bombilla podrían influir, pero no explican completamente la diferencia. Esto sucede porque el modelo se basó en una entrada tipo escalón de 100% de ciclo de trabajo, mientras que con  $K_p=1$ , la bombilla funciona con un ciclo de trabajo mucho menor.

Aumentar  $K_p$  hace que la ganancia en estado estacionario se acerque más a 1 y que el ciclo de trabajo sea mayor, alineándose mejor con las condiciones del modelo  $P(s)$ .

Además, como la función de transferencia en lazo cerrado tiene un polo en  $-(1+83.5K_p)/66$ , al incrementar  $K_p$ , el sistema sigue respondiendo como un sistema de primer orden, pero llega al estado estacionario más rápido. Esto se refleja en el perfil de temperatura y el esfuerzo de control requerido. (ver figura 15)

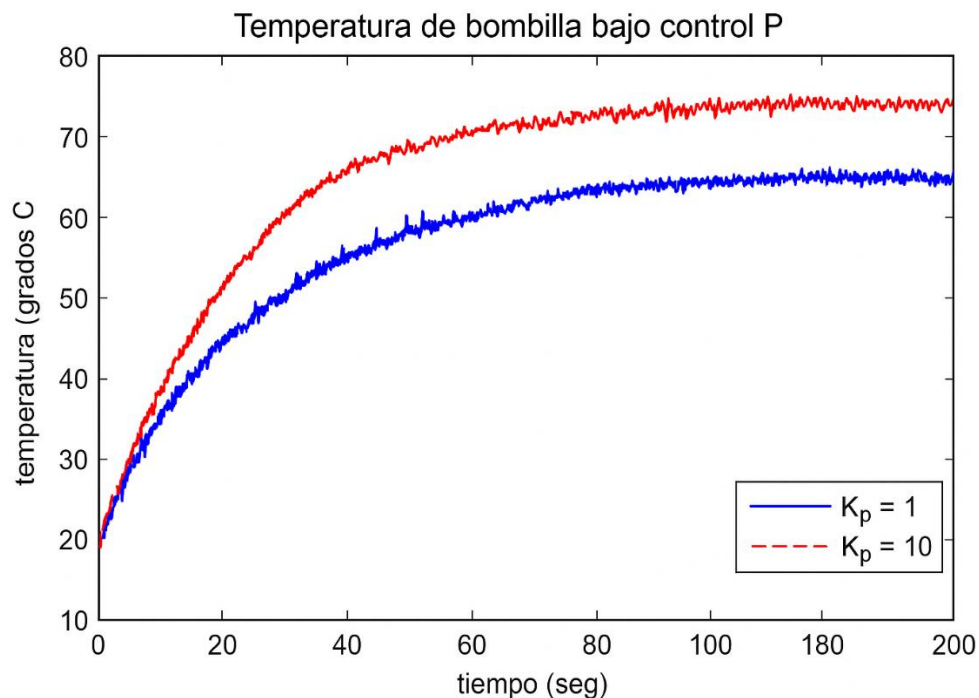


Figura 15. Bombilla bajo P control.

Fuente: propio.

En lugar de aumentar  $Kp$ , otra opción es escalar la referencia  $T_{ref}$  para que la temperatura en estado estable coincida con la deseada, aunque esto depende de un modelo preciso. Otra alternativa es agregar una acción integral al controlador, lo cual se explorará a continuación.

El PI control agrega un término proporcional a la integral del error, con la ecuación  $C(s)=Kp + Ki/s$ . Esto convierte el sistema en tipo 1, lo que permite eliminar el error en estado estable para una referencia constante. La ganancia DC del sistema es 1, lo que garantiza error cero en estado estable para una referencia constante. Un mayor  $Ki$  acelera la corrección del error.

Mientras que el control P estabilizaba la temperatura por equilibrio entre el calor generado y el disipado, el control PI sigue aumentando el esfuerzo de control hasta eliminar el error. Esto ocurre porque el término integral acumula el error y la ganancia DC del sistema es 1, lo que garantiza error cero en estado estable. Un mayor  $Ki$  acelera la corrección del error.

Mientras que el control P estabilizaba la temperatura por equilibrio entre el calor generado y el disipado, el control PI sigue aumentando el esfuerzo de control hasta eliminar el error. Esto ocurre porque el término integral acumula el error en el tiempo. Un efecto secundario es que el sistema pasa a ser de segundo orden, lo que puede causar oscilaciones o sobrepaso. Para analizarlo, se prueba el sistema con  $Kp=1$  y  $Ki=0.02$  con el modelo de la figura 16.

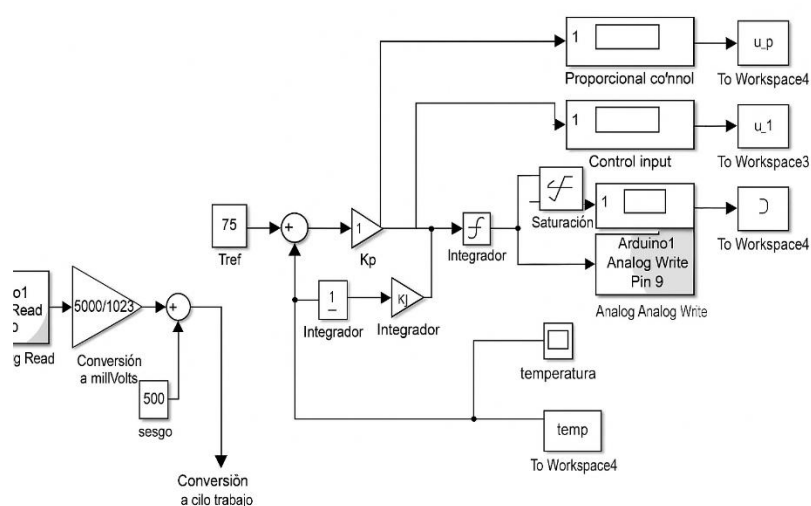
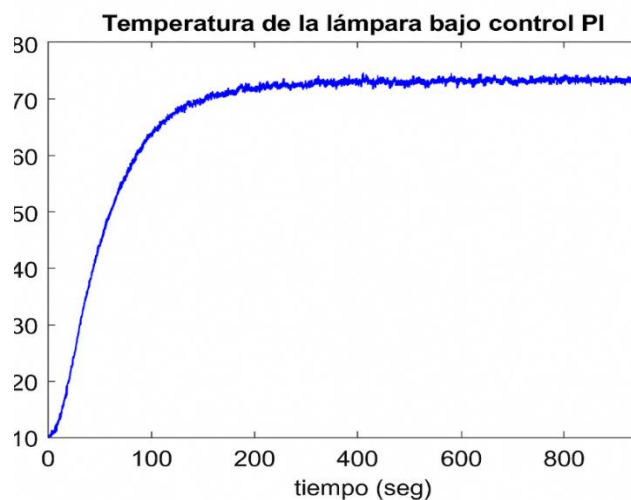


Figura 16. MATLAB Modelo PI Control en Simulink.

Fuente: propia.

Al ejecutar el modelo, se observa cómo evolucionan los esfuerzos de control proporcional e integral. Al inicio, el error es grande, por lo que el control proporcional es alto, pero disminuye conforme el error se reduce. El control integral sigue aumentando incluso cuando el error disminuye, ya que acumula el error en el tiempo, como se observa en la figura 17.

Cuando la temperatura alcanza el valor deseado, el error y el control proporcional son cero, pero el control integral sigue siendo alto debido a la acumulación previa. Esto provoca un sobrepaso de la temperatura deseada, seguido de una corrección negativa, lo que puede causar oscilaciones. Este comportamiento refleja el efecto de un sistema de segundo orden, con la posibilidad de polos complejos y oscilaciones.



*Figura 17. Bombilla bajo PI control.*

Fuente: propia.

Agregar un control integral ayuda a que el sistema llegue más rápido al valor correcto, pero puede hacer que el sistema se mueva hacia adelante y hacia atrás (oscilaciones) antes de estabilizarse. Si se aumenta el valor de  $K_i$ , el sistema corrige el error más rápido, pero también puede hacer que pase de largo el valor correcto y luego vuelva a ajustarse (más oscilaciones). Si se deja el valor de  $K_p$  igual, el sistema puede corregir el error más rápido, pero con más oscilaciones. En resumen, aumentar  $K_i$  ayuda a corregir el error rápido, pero hace que el sistema se mueva más antes de estabilizarse.

Posteriormente, se pasa al diseño de un prototipo que incorpore un sistema de control automático para el control de temperatura, lo que implica la selección de los componentes para la construcción del maletín didáctico que alojará los elementos del control de temperatura.

El computador PC Box HDMI de la figura 18 es un modelo de computadora de escritorio tipo "box" diseñado para ser compacto y de bajo consumo energético. Está orientado a aquellos usuarios que necesitan una solución económica y funcional para tareas básicas, como navegación por internet, procesamiento de textos y proyectos que no requieren alto rendimiento. Además, este modelo cuenta con un puerto HDMI, lo que lo hace adecuado para conectarse a monitores y otros dispositivos de visualización compatibles.



*Figura 18.* Computador PC BOX  
Fuente: Amazon.com.

El display HDMI de la figura 19 es un monitor compacto de 10.1 pulgadas, ideal para conectar dispositivos como el Raspberry Pi o cualquier otra computadora que soporte HDMI. Es perfecto para proyectos de electrónica y visualización de datos o interfaces gráficas en espacio limitado. La pantalla es lo suficientemente pequeña como para ser portátil, pero también ofrece una resolución adecuada para tareas simples o como pantalla de segunda opción en configuraciones de bajo costo.



*Figura 19.* Display HDMI del maletín didáctico.  
Fuente: Amazon.com.

El maletín de aluminio Redline F-5335B de la figura 20, para herramientas está fabricado en aluminio, lo que le proporciona una gran resistencia, pero a la vez es liviano. Viene con 4 compartimientos, lo que facilita el almacenamiento y organización de herramientas, cables o componentes electrónicos. Es ideal para quienes necesitan transportar herramientas y mantenerlas organizadas, especialmente en proyectos de electrónica o mecánica ligera.



*Figura 20.* Maletín Aluminio Redline.  
Fuente: Homecenter.

El conector 250VAC/15A, con suiche para panel, de la figura 21, es ideal para ser utilizado en paneles de control o distribución de energía. Su diseño robusto lo hace adecuado para sistemas que operan en corriente alterna de 250V a 15A. El interruptor integrado facilita la conexión y desconexión rápida sin necesidad de un interruptor externo.



*Figura 21.* Conector 250VAC/15A, con suiche, para Panel.  
Fuente: Didácticas electrónicas.

La fuente 5V / 5<sup>a</sup> de la figura 22 es un dispositivo de alimentación con salida de 5V y 5A, ideal para alimentar dispositivos electrónicos que requieran un voltaje bajo pero suficiente corriente para su funcionamiento. Esta fuente es perfecta para proyectos de Arduino, Raspberry Pi, o dispositivos que necesiten una corriente estable de 5V.



*Figura 22.* Fuente 5v/5<sup>a</sup> para alimentación del módulo didáctico.  
Fuente: Didácticas electrónicas.

La placa de Arduino Nano de la figura 23, es una versión compacta de la placa Arduino, ideal para proyectos donde el espacio es limitado. Cuenta con el chip CH340, que la hace compatible con la mayoría de los entornos de desarrollo Arduino. Es perfecta para aplicaciones de automatización, control de sensores y dispositivos electrónicos.



*Figura 23.* Arduino nano.  
Fuente: Didácticas electrónicas.

Luego de seleccionar los componentes de los maletines didácticos para el desarrollo de prácticas de control automático – caso control de temperatura, se construye el módulo juntando las partes e interconectando los dispositivos.

El maletín se construye utilizando componentes que combinan materiales como el acrílico, el plástico PVC, el aluminio y componentes electrónicos. Este maletín se basa en el principio de poder hacer las prácticas independientemente de una sala de cómputo. Es decir, el maletín se puede transportar a distintas partes, ya que en su interior alberga un computador y un monitor. Estos se conectan con una placa de Arduino nano a través de unos terminales que permitirán la conexión a diferentes experimentos.

El maletín tiene internamente, un soporte para conectar los diferentes modelos de experimentación. El módulo de experimentación es un bloque que contiene. El protoboard y los

elementos específicos de experimentación de control automático, en este caso, el control de temperatura. Tan pronto como se encienda el computador se abrirá el asistente de experimentación, el cual es producto de futuros trabajos de grado, este deberá orientar al estudiante en el desarrollo de la práctica.



*Figura 24.* Disposición de los elementos del maletín.

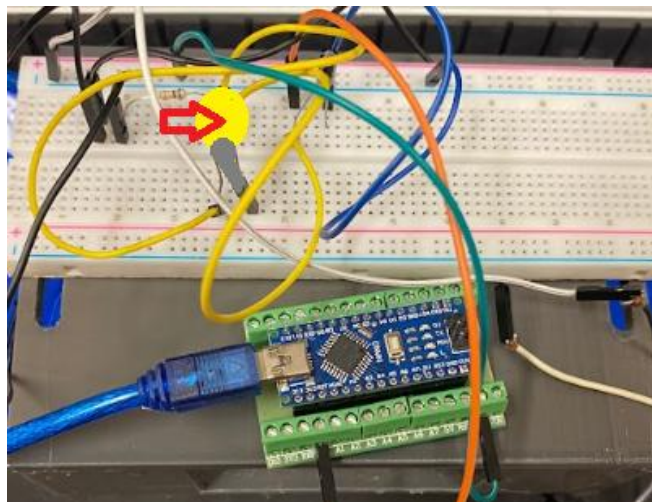
Fuente: Propia.

La figura 24 muestra la forma en que se ve el prototipo que se desarrolló para cumplir con el segundo objetivo. Se observa el monitor que está en la tapa y en la parte de abajo se tiene la base donde se conectan los diferentes experimentos y se observa de color gris, el módulo de experimentación que se aloja en la cavidad que tiene el maletín. Tan pronto como se abre el maletín, el módulo de experimentación, que tiene unas patas en forma de banana de 4 mm, se conecta a la base azul para que el experimento pueda realizarse.



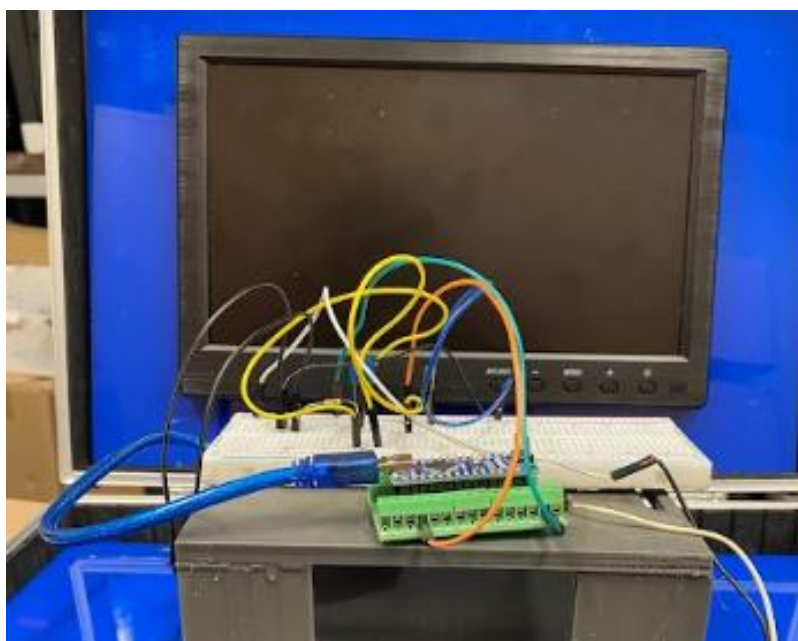
*Figura 25.* Disposición interna del computador y las fuentes de alimentación.  
Fuente: Propia.

La figura 25 muestra la disposición interna del computador y las fuentes de alimentación que van debajo de la cubierta azul que tiene los conectores para ubicar el módulo de experimentación. Se observa como el sistema requiere de una fuente de alimentación para el monitor, otra para el computador y una fuente de alimentación que se utiliza para los experimentos que van en el módulo de experimentación.



*Figura 26.* Interconexión del experimento a la palca de Arduino.  
Fuente: Propia.

La figura 26 muestra la interconexión de los elementos que constituyen el experimento. Estos elementos varían de experimento a experimento. Para el caso del presente proyecto, los elementos deberían ser una bombilla incandescente y un sensor de temperatura tipo TPM36, también sirve un LM35. Estos elementos van conectados a la placa de Arduino. En algunos casos, adicionalmente, debajo del módulo de experimentación, se encuentra un driver que se encarga de manejar la corriente del actuador. En los experimentos, todos esos elementos van unidos a la placa de Arduino para que se realice el control a partir de la programación que se recibe desde el paquete MATLAB-*Simulink*, que está alojado en el computador del maletín didáctico.



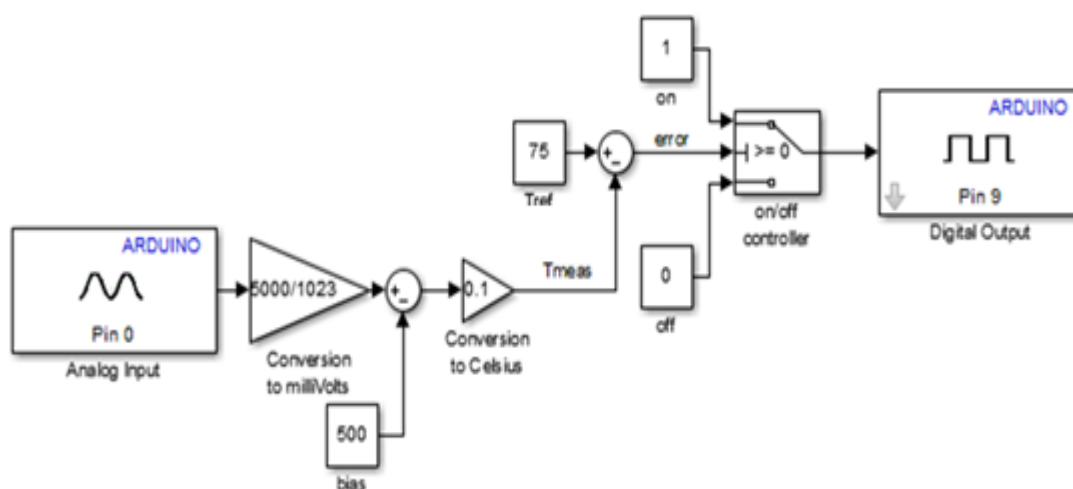
*Figura 27.* Ubicación del módulo de experimentación durante las prácticas.  
Fuente: Propia.

La figura 27 muestra. la ubicación del módulo de experimentación encima de la base, lo cual se logra incrustando las bananas de 4 mm que tiene el módulo de experimentación, en las bananas hembra que tiene la base. Esto permitirá que el Arduino nano, que va en el módulo de experimentación, se comunique con el computador para que el paquete MATLAB-*Simulink*, que está alojado en el computador, pueda enviar información a la placa de Arduino y también pueda recibir la información, en tiempo real, sobre los datos que se miden del experimento realizado.

Para la evaluación del comportamiento y desempeño del prototipo mediante pruebas experimentales, determinando su efectividad y su aplicabilidad, es necesario considerar que, hasta ahora, el control de la temperatura del bombillo se ha hecho desde el computador usando *Simulink*. Esto se logra gracias a un paquete especial que permite que el computador y el Arduino se comuniquen en tiempo real. Así se puede ver en gráficas la temperatura del bombillo y cómo se está controlando.

Pero hay otra opción: hacer que el Arduino controle la temperatura por sí solo, sin depender del computador. Esto se llama control embebido. Tiene dos ventajas: El programa corre más rápido porque no tiene que compartir recursos con otros programas del computador y no necesitas tener el Arduino conectado al computador todo el tiempo. Puede ser usado de forma independiente, por ejemplo, para crear un calentador de café inteligente.

Para usar este modo, se necesita otro paquete llamado Arduino Support Package, que tiene bloques parecidos a los que ya se usan. Solo se hacen algunos cambios (como no usar ciertas herramientas y conectar bien el puerto). Luego, al dar clic en un botón (o presionar Ctrl+B), el programa se convierte en código que se guarda y ejecuta directamente en el Arduino. Esto se llama Autogeneración de código, y es algo que se usa mucho en la industria.



*Figura 28.* Control Embebido que se comunica con la placa.  
Fuente: propia.

La figura 28 presenta el control embebido que se desarrolla en *Simulink* y se comunica con la aplicación que está alojada en la placa de Arduino. Se observa como la medición que se obtiene del Arduino pasa por un conversor a milivoltios, luego se le hace una función de resta con un valor “Bias” para posteriormente, hacer la conversión a grados Celsius. Finalmente se hace una resta con respecto a un valor de 75°, lo cual da como resultado una acción que permite enviar Uno o Cero al Arduino para hacer en este caso, el control on off.

Para implementar el control ON/OFF se utilizó un código desarrollado en Arduino que permite activar o desactivar la lámpara incandescente según la temperatura medida por el sensor TMP36. El código compara la temperatura real con el valor de referencia (setpoint) y actúa sobre el relé conectado al actuador. Este código es el siguiente:

```
// Pines
const int sensorPin = A0;    // TMP36 conectado al pin analógico A0
const int relePin = 8;      // Relé conectado al pin digital 8

// Variables de control
float setpoint = 75.0;      // Temperatura objetivo en grados Celsius
float temperatura = 0.0;

void setup() {
  pinMode(relePin, OUTPUT);
  digitalWrite(relePin, LOW); // Inicialmente apagado
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int lectura = analogRead(sensorPin);

  // Convertir la lectura del TMP36 a temperatura en °C
  float voltaje = lectura * 5.0 / 1023.0;
```

```
temperatura = (voltaje - 0.5) * 100.0;

Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temperatura);
Serial.println(" °C");

// Control ON/OFF
if (temperatura < setpoint - 1) {
  digitalWrite(relePin, HIGH); // Enciende la lámpara
} else if (temperatura > setpoint + 1) {
  digitalWrite(relePin, LOW); // Apaga la lámpara
}

delay(1000); // Espera 1 segundo
}
```

En este apartado se tendrá en cuenta todo el proceso anterior y las nuevas necesidades que surjan para finalizar los detalles pertinentes, evaluando si cumple con el objetivo para el cual fue creado y que sea accesible.

Finalmente, se propone desarrollar una guía de prácticas y ejercicios para el sistema de control automático, facilitando el aprendizaje y la aplicación práctica de conceptos de control, con el fin de brindar la información adicional y promover el contenido pedagógico y experimental que ha sido creado. El manual de prácticas con el módulo didáctico, que acompaña el maletín, es un adjunto al proyecto y describe las diferentes fases de las prácticas que se desarrollan para hacer control de temperatura con el maletín didáctico. También presenta. Medidas de seguridad que se deben tener durante el uso de los maletines didácticos y algunas recomendaciones para la realización de su mantenimiento.

## 7 Conclusiones

A partir del análisis de diferentes procesos eléctricos que requieren control de temperatura, fue posible identificar los componentes y situaciones donde esta variable es crítica, lo cual permitió delimitar de manera precisa las condiciones necesarias para el diseño de un sistema automatizado. Este diagnóstico inicial fue clave para comprender las exigencias reales de control térmico en aplicaciones industriales.

El diseño del prototipo integró sensores, controladores y actuadores en una estructura funcional, basada en Arduino y complementada con simulaciones en MATLAB y Simulink. Esta combinación permitió representar con fidelidad el comportamiento térmico del sistema y facilitar la implementación de estrategias como ON/OFF, proporcional y PI, mostrando respuestas claras ante variaciones en la temperatura.

La evaluación práctica del sistema demostró que cada estrategia de control tiene ventajas y limitaciones. El control ON/OFF, aunque simple, produjo oscilaciones frecuentes; el proporcional ofreció una respuesta más suave, pero con error en estado estacionario; y el PI mejoró la precisión, aunque generó oscilaciones típicas de un sistema de segundo orden. Estas observaciones permiten comparar objetivamente el desempeño de cada método bajo condiciones similares.

Finalmente, se desarrolló una guía de prácticas orientada al uso pedagógico del módulo. Esta guía facilita la aplicación práctica de los conceptos de control automático y convierte el prototipo en una herramienta útil para el aprendizaje. Su diseño modular y accesible lo hace adaptable a diferentes niveles de formación técnica en áreas como instrumentación, control y automatización.

## 8 Recomendaciones

Es recomendable continuar con el perfeccionamiento del módulo incluyendo mejoras en la interfaz gráfica y en la visualización de datos en tiempo real, lo cual facilitaría aún más la interacción por parte del estudiantado. También sería útil implementar un sistema de registro automático de las variables medidas para permitir análisis posteriores y comparación entre pruebas.

Se sugiere ampliar las estrategias de control utilizadas, explorando algoritmos más avanzados como el control difuso o adaptativo, lo que enriquecería las posibilidades didácticas del módulo y ofrecería una visión más amplia sobre las alternativas disponibles en la industria. Asimismo, podría considerarse el uso de elementos calefactores alternativos o sistemas de enfriamiento controlado, para permitir un rango más amplio de experimentación y observar distintos comportamientos térmicos.

Desde el punto de vista pedagógico, es aconsejable complementar el uso del módulo con una guía detallada de prácticas que incluya explicaciones teóricas, ejemplos de configuración y espacios para análisis de resultados. Esto fortalecería el proceso de enseñanza-aprendizaje y facilitaría su incorporación como herramienta regular en laboratorios de control automático. Finalmente, se recomienda promover el uso del módulo en otros cursos relacionados, como instrumentación o electrónica aplicada, para aprovechar su versatilidad y fomentar el aprendizaje transversal.

## 9 Referencias bibliográficas

- Arduino. (15 de noviembre de 2024). ¿Qué es Arduino? Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Beléndez, A. (2017). Calor y temperatura. *Fundamentos Físicos de la Ingeniería I*.
- Benitez, I. O., Rivas, R., Feliu, V., Sanchez, L. P., & Sanchez, L. A. (2016). Fuzzy gain scheduled Smith predictor for temperature control in an industrial steel slab reheating furnace. *IEEE Latin America Transactions*, 14(11), 4439-4447.
- Calor y control. (15 de noviembre de 2024). Controles de Temperatura: Precisión y Confiabilidad en la Industria Moderna. Recuperado de <https://calorycontrol.com.mx/2024/04/13/controles-de-temperatura-confiabilidad/#:~:text=Mantener%20una%20temperatura%20adecuada%20es,entornos%20cada%20vez%20m%C3%A1s%20precisos.>
- Chagoya, E. R. (2008). Métodos y técnicas de investigación. *Obtenido de Gestipolis: https://www.gestipolis.com/metodos-y-tecnicas-de-investigacion.*
- Control Automático Educación. (15 de noviembre de 2024). Lazo Abierto y Lazo Cerrado. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/>
- Dewesoft. (15 de noviembre de 2024). ¿Qué es un controlador PID? Recuperado de <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-controlador-pid>
- Electricity Magnetism. (15 de noviembre de 2024). ¿Cómo afecta la temperatura a la resistencia eléctrica? Recuperado de <https://www.electricity-magnetism.org/es/como-afecta-la->

[temperatura-a-la-resistencia-electrica/#:~:text=La%20relaci%C3%B3n%20entre%20la%20temperatura%20y%20la%20resistencia,operar%20dispositivos%20y%20sistemas%20el%C3%A9ctricos%20de%20Omanera%20eficiente.](#)

Esteban Nieto, N. (2018). Tipos de investigación.

Gonzalez, I. O. B., Perez, R. R., Batlle, V. F., & Garcia, F. J. C. (2015). Temperature control based on a modified Smith predictor for injectable drug formulations. *IEEE Latin America Transactions*, 13(4), 1041-1047.

Imagina Formación. (15 de noviembre de 2024). ¿Qué es MATLAB y para qué sirve? Recuperado de <https://imaginaformacion.com/tutoriales/que-es-MATLAB>

Ingenieriapedia. (14 de octubre de 2023). Sensores de temperatura: tipos, principio de funcionamiento, comparación, costos y aplicaciones. Recuperado de <https://ingenieriapedia.com/sensores-de-temperatura/>

Libretexts. (15 de noviembre de 2024). Bucles de control comunes y modelo para control de temperatura. Recuperado de [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa\\_Industrial\\_y\\_de\\_Sistemas/Libro%3A\\_Din%C3%A1mica\\_y\\_Control\\_de\\_Procesos\\_Qu%C3%ADmicos\\_\(Woolf\)/11%3A\\_Arquitecturas\\_de\\_control/11.06%3A\\_Bucles\\_de\\_control\\_comunes\\_y\\_modelo\\_para\\_control\\_de\\_temperatura](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/11%3A_Arquitecturas_de_control/11.06%3A_Bucles_de_control_comunes_y_modelo_para_control_de_temperatura)

Math Works. (15 de noviembre de 2024). Introducción a Simulink. Recuperado de <https://la.mathworks.com/help/Simulink/getting-started-with-Simulink.html>

Ojeda-Misses, M. A. (2022). Modelado y control de temperatura para una clase de sistema derivado de la ley de enfriamiento de Newton. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial4), 160-167.

- Omega. (15 de noviembre de 2024). Controladores de temperatura. Recuperado de <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html>
- Orion Italia. (15 de noviembre de 2024). Control de temperatura del transformador. <https://www.orionitalia.com/es/aplicaciones/industriales/unidad-control-temperatura-transformador>
- Rezende, E. L., & Bacigalupe, L. D. (2015). Thermoregulation in endotherms: physiological principles and ecological consequences. *Journal of Comparative Physiology B*, 185, 709-727.
- Rodríguez, C. R., Oré, J. L. B., & Vargas, D. E. (2021). *Las variables en la metodología de la investigación científica* (Vol. 78). 3Ciencias.
- Salcedo Hernández, J., Rivas-Perez, R., & Sotomayor Moriano, J. J. (2018, September). Model reference adaptive temperature control of a rotary cement kiln. In *Proceedings of the 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition—Latin America (T&D-LA), Lima, Peru* (pp. 18-21).
- Santos, C. F., Ancines, C. A., & Krenzinger, A. (2018). Temperature controller for simultaneously test of solar collectors in series. *IEEE Latin America Transactions*, 16(6), 1708-1714.
- Studysmarter. (15 de noviembre de 2024). Tecnologías de enfriamiento. Recuperado de <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/tecnologias-de-enfriamiento/>
- Torres, W. L., Araujo, I. B. Q., Menezes Filho, J. B. & Costa Junior, A. G. (2017). Mathematical Modeling and PID Controller Parameter Tuning in a Didactic Thermal Plant, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 7, pp. 1250-1256. DOI: 10.1109/TLA.2017.7959343.

University of Michigan. (2019). Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS).  
<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS>

Villar, J. R., de la Cal, E., & Sedano, J. (2008). Energy saving by means of multiagent systems and fuzzy systems. *IEEE Latin America Transactions*, 6(6), 517-523.

ZIEHL-ABEGG. (15 de noviembre de 2024). Transformadores Refrigeración de transformadores con sistemas que incluyen ventiladores y tecnología de control de

ZIEHL-ABEGG. Recuperado de <https://www.ziehl-abegg.com/es-co/industrias/transformadores?srsId=AfmBOooQM7JxSSspi3UnVRYzINtNN0QDBrDpZyxXuriStOK0JKmj8sSv>