



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Desarrollo de un sistema didáctico de termofluidística controlado por medio de lógica programada

REALIZADO POR:

Luis Camacho Cordero

COORDINADOR DE PRÁCTICA:

Sebastián Mata

II SEMESTRE 2024



Carrera evaluada y acreditada por:

Agencia de Acreditación de Programas de Ingeniería y Arquitectura.

Datos personales:

Nombre completo: Luis Antonio Camacho Cordero.

Número de cédula: 1-1788-0149.

Número de carné: 2019044788.

Edad: 24.

Números de teléfono: 84729275.

Correos electrónicos: lcamacho112@estudiantec.cr.

Dirección exacta de domicilio: Condominio Torres del Sol, Tres Ríos, Cartago.

Datos de la empresa:

Nombre: Laboratorio Delta.

Actividad principal: desarrollo de los proyectos de investigación.

Dirección: Cartago, Cartago.

Contacto: Juan José Rojas Hernández.

Teléfono: 2550-9339.

Carta de aprobación del filólogo

Cartago, 15 de noviembre de 2024

Los suscritos, Elena Redondo Camacho, mayor, casada, filóloga, incorporada a la Asociación Costarricense de Filólogos con el número de carné 0247, portadora de la cédula de identidad número 3-0447-0799 y, Daniel González Monge, mayor, casado, filólogo, incorporado a la Asociación Costarricense de Filólogos con el número de carné 0245, portador de la cédula de identidad número 1-1345-0416, ambos vecinos de Quebradilla de Cartago, revisamos el trabajo final de graduación que se titula: *Desarrollo de un sistema didáctico de termofluidística controlado por medio de lógica programada*, sustentado por Luis Camacho Cordero.

Hacemos constar que se corrigieron aspectos de ortografía, redacción, estilo y otros vicios del lenguaje que se pudieron trasladar al texto. A pesar de esto, la originalidad y la validez del contenido son responsabilidad directa de la persona autora.

Esperamos que la participación de Filólogos Bórea Costa Rica satisfaga los requerimientos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

X

Elena Redondo Camacho
Filóloga - Carné ACFIL n.º 0247

X

Daniel González Monge
Filólogo - Carné ACFIL n.º 0245

Agradecimiento

Agradezco a mi familia, por apoyarme siempre de todas las formas posibles y a todas las personas con las que compartí durante el proceso.

Al profesor, Juan José Rojas, y a todos los integrantes del Laboratorio Delta, por brindarme la oportunidad y su guía durante el desarrollo de este proyecto.

Resumen

Como respuesta a la necesidad de mejorar el campo técnico educativo en el control automático. Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un sistema didáctico que simula un proceso de transferencia de calor en fluidos. El sistema tiene la expectativa de proveer a las personas estudiantes una experiencia cercana a lo que es la integración de sensores, actuadores y controladores de lógica programada. La configuración permite a la persona estudiante relacionarse con la automatización en el ámbito industrial, la transferencia de calor y los sistemas de control, apoyando el desarrollo de habilidades técnicas y conocimiento en esas áreas.

Este proyecto se implementa en colaboración con el Laboratorio Delta de la Escuela de Ingeniería Electromecánica y se concentra en proveer una herramienta de educación práctica. El sistema se diseña para transferir calor por medio de módulos Peltier, los cuales pueden calentar y enfriar un fluido, según la corriente aplicada. Mediante sensores de temperatura y de flujo, se monitorea el comportamiento del sistema, mientras que dos bombas centrífugas hacen circular el fluido por todo el trayecto. La simulación se realizó en Matlab y su extensión Simulink, que permite modelar este tipo de sistemas antes de su implementación física.

El sistema final demuestra la integración de los sistemas de automatización, entregando un sistema didáctico y flexible que se adapta a varios objetivos de aprendizaje. Este proyecto opera a una temperatura que va de 5 °C a 55 °C y se ofrece un control preciso de la transferencia de calor.

Abstract

In response to the need for improving the technical education field in automatic control, this project focuses on the design and development of a didactic system that simulates a heat transfer process. The system aims to provide students with a real-world experience of the integration of sensors, actuators, and programmable logic controllers. This configuration allows students to engage with automation, heat transfer, and control systems, supporting their technical abilities and knowledge in these areas.

This project is implemented in collaboration with the Laboratorio Delta of the Escuela de Ingeniería Electromecánica, focusing on providing a practical tool for education. The system is designed to transfer heat using Peltier modules, which can heat or cool a fluid, depending on the applied current. With temperature sensors and actuators, the system behavior is monitored, while two centrifugal pumps circulate the fluid throughout all the pipes. The simulation was made out in Matlab and an extension called Simulink, which allows the modeling of this type of systems, before physical implementation.

The final system demonstrates the integration of automation systems, providing students with a flexible, didactic station that can be adapted for various learning objectives. This project operates at a temperature of 5°C to 55°C, offering precise control of the heat transfer system.

Índice de contenido

Capítulo I.....	15
Introducción	15
Reseña de la empresa	16
Planteamiento del problema	17
Descripción del problema por resolver.....	17
Requerimientos y necesidades para el desarrollo del proyecto	18
Objetivo general	21
Objetivos específicos.....	21
Justificación.....	22
Viabilidad	23
Metodología	23
Alcance.....	24
Limitaciones	24
Capítulo II.....	26
Marco teórico	26
Sistemas	26
Sistema de control	26
Control proporcional integral derivativo (PID).....	27
Sensores y actuadores.....	27
Arduino.....	28
Controlador Lógico Programable (PLC).....	28
Transferencia de calor	29

Intercambiador de calor.....	29
Válvulas.....	30
Efecto Peltier.....	30
Módulo Peltier.....	30
Matlab y Simulink.....	31
Simscape.....	32
Motores DC sin escobillas.....	32
Capítulo III.....	34
Caracterización del sistema.....	34
Propuesta de componentes y modo de funcionamiento.....	34
Sistema preliminar.....	36
Operación del sistema.....	38
Capítulo IV.....	42
Diseño del sistema.....	42
Modelado del sistema.....	42
Esquema de modelado.....	42
Componentes por utilizar.....	43
Bomba centrífuga.....	43
Tanque de almacenamiento.....	43
Tuberías.....	44
Módulos Peltier.....	45
Intercambiador de calor.....	46
Sistema final y pruebas.....	47

Capítulo V.....	51
Lista de componentes.....	51
Intercambiador de calor.....	51
Módulo Peltier.....	52
Bomba centrífuga.....	53
Pasta térmica.....	54
Sensor de caudal.....	55
Sensor de presión.....	56
Arduino Mega.....	56
Radiador.....	57
Sensor de temperatura.....	58
Reservorio de líquido.....	59
Relé de estado sólido.....	59
Fuentes de alimentación.....	60
Convertidor DC-DC.....	62
Presupuesto final.....	62
Capítulo VI.....	64
Integración del sistema.....	64
Adquisición de los elementos del sistema.....	64
Estación del sistema didáctico.....	65
Configuración de componentes y cableado.....	66
Pruebas y validación del sistema.....	68
Prueba 1.....	69

	10
Prueba 2	71
Capítulo VII	73
Conclusiones	73
Objetivo específico n.º 1	73
Objetivo específico n.º 2	73
Objetivo específico n.º 3	73
Objetivo específico n.º 4	74
Recomendaciones	74
Bibliografía	76
Anexos	80
Anexo 1. Programación del Arduino y de Python	80

Índice de tablas

Tabla 1 Partes interesadas del proyecto	19
Tabla 2 Lista de necesidades por parte de los interesados	19
Tabla 3 Formato textual para cada requerimiento	20
Tabla 4 Lista de requerimientos de las partes interesadas	20
Tabla 5 Metodología por seguir	23
Tabla 6 Lista preliminar de componentes	34
Tabla 7 Prueba de temperatura mínima del sistema preliminar	40
Tabla 8 Prueba de temperatura máxima del sistema preliminar	40
Tabla 9 Presupuesto final	63

Índice de figuras

Figura 1 Logo de Laboratorio Delta	16
Figura 2 Conversión típica de datos de entrada y salida de sensores y actuadores	28
Figura 3 Aplicaciones de Simscape	32
Figura 4 Subsistema para calentar y enfriar el refrigerante	35
Figura 5 Sistema principal de transferencia de calor	36
Figura 6 Sistema de transferencia preliminar para pruebas	37
Figura 7 Simbología de fuente de flujo constante	43
Figura 8 Bloque de reservorio de fluido	44
Figura 9 Bloque de tubería de líquido térmico	45
Figura 10 Bloque de fuente de temperatura controlada	46
Figura 11 Bloque de intercambiador de calor	47
Figura 12 Sistema modelado completo	48
Figura 13 Gráfico de temperatura (°C) vs. tiempo (s) para prueba de enfriamiento	49
Figura 14 Gráfico de temperatura (°C) vs. tiempo (s) para prueba de calentamiento	50
Figura 15 Intercambiador de calor Clyxgs	51
Figura 16 Módulo Peltier	52
Figura 17 Bomba centrífuga	54

	13
Figura 18 Sensor de caudal	55
Figura 19 Sensor de presión	56
Figura 20 Arduino Mega.....	57
Figura 21 Radiador de enfriamiento para agua	58
Figura 22 Sensor de temperatura	58
Figura 23 Reservorio de fluido	59
Figura 24 Relé de estado sólido.....	60
Figura 25 Fuente de 48 V.....	61
Figura 26 Fuente de 12 V.....	61
Figura 27 Convertidor DC-DC	62
Figura 28 Vista general de prototipo en Fusion 360.....	65
Figura 29 Sistema en proceso de construcción	67
Figura 30 Sistema funcional en físico.....	67
Figura 31 Prueba de funcionamiento 1. Las mediciones fueron realizadas bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura inicial de 25 °C, voltaje aplicado de 30 V al módulo Peltier.	69
Figura 32 Regulador de temperatura deseada en Prueba 1	69
Figura 33 Las mediciones fueron realizadas bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura inicial de 20 °C, voltaje aplicado de 30 V al módulo Peltier.	71

Figura 34 Regulador de temperatura deseada en Prueba 2.....	71
-------------------------------------------------------------	----

Capítulo I

Introducción

En la actualidad, el mundo cada vez optimiza sus métodos de control y uso de la tecnología en las industrias; la educación y la formación de las universidades deben seguir el mismo paso de desarrollo. Este progreso se ha visto afectado por varios factores que han llevado a que no se tenga la velocidad de avance deseada, lo que hace que las personas estudiantes se vean limitadas en el futuro en el momento de usar equipos en sus vidas laborales. Para enfrentar este desafío, se planea implementar un sistema didáctico que permita simular la tecnología que se utiliza en el mundo real.

El presente proyecto aborda esta necesidad de mejorar la formación en control automático industrial, de manera que el sistema didáctico permita a las personas estudiantes interactuar con sensores y actuadores, simulando situaciones reales. El uso de un controlador lógico programable (PLC, por sus iniciales en inglés) Arduino como unidad de control ayuda a llevar más allá el aprendizaje, incorporando programación y lógica de control distintas a las convencionales.

La integración de este sistema brinda una oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos de las personas estudiantes, dándoles habilidades esenciales en un mercado laboral que demanda profesionales capacitados en todo tipo de tecnología industrial y automatización. Este proyecto, al unificar varios tipos de tecnologías, permite que se introduzca a la población estudiantil a una comprensión más profunda del control automático y también que se impulse la capacidad de crear programas de manera autónoma por medio de Arduino. Esto deja una gran variedad de aplicaciones que puede tener el sistema, según cómo se programe. Por último, cada

usuario puede configurar el dispositivo, de forma que la creatividad de cada persona termine integrándose con el funcionamiento específico de cada día.

Reseña de la empresa

Figura 1

Logo de Laboratorio Delta



Fuente: Laboratorio Delta, 2020.

El Laboratorio Delta es un laboratorio de investigación de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica. Surgió en 2017 con la finalidad fundamental de brindar un entorno de investigación, innovación y colaboración entre estudiantes, profesores e investigadores. En este espacio, se cataliza la creatividad resultante de la interdisciplina entre distintas ingenierías, con un enfoque en la resolución de desafíos y la creación de proyectos y servicios de relevancia (Laboratorio Delta, 2020).

Los objetivos de este laboratorio se pueden dividir en tres puntos distintos que se entrelazan. Como primer punto, se tiene la integración de varias ingenierías, como la mecánica, la eléctrica y la electrónica; con esto se abordan problemas complejos y se obtienen soluciones

integrales. En segundo lugar, se cuenta con la investigación de vanguardia, con base en el desarrollo de proyectos de investigación que sean innovadores y de relevancia. Por último, se tiene la alineación al Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PNCTI), que busca crear productos y servicios que respondan a las necesidades del país (Laboratorio Delta, 2020).

Como misión del laboratorio, se tiene que se desea un espacio de integración de conocimientos provenientes de diversas áreas relevantes de las ingenierías. En este espacio, tanto estudiantes como profesores tienen la oportunidad de generar y desarrollar sus propuestas de proyectos e innovación. Además, se presenta como un terreno en el cual la creación y la colaboración se dan constantemente y se respaldan por medio de la promoción de sus investigaciones.

Planteamiento del problema

Descripción del problema por resolver

Para la Escuela de Ingeniería Electromecánica, la innovación en los sistemas de enseñanza es primordial para poder mantenerse al nivel del avance que han tenido las industrias a lo largo de los últimos años. En estos momentos, la automatización representa un papel fundamental en la mejora de la eficiencia y la productividad en diversos sectores laborales. Sin embargo, la formación actual puede estar quedando atrás, según la industria específica y la tecnología que utilicen.

La principal problemática que se busca resolver es la deficiencia de profesionales realmente capacitados con las habilidades actualizadas que se necesitan en las industrias. En un entorno donde la tecnología está en constante cambio e innovación, este tipo de sistemas se convierte en un pilar esencial para que la enseñanza siga el paso a este desarrollo.

La implementación de este sistema didáctico tiene un impacto directo en la formación profesional que brinda la Escuela de Ingeniería Electromecánica, lo que aumenta la competitividad en el ámbito de mercado de educación superior. Además, ayuda a las empresas, ya que proporciona a largo plazo un acceso a profesionales con una mejor preparación y mayor conocimiento en las tecnologías que se utilizan actualmente. Por otro lado, este tipo de sistemas de automatización genera una mejor productividad y manejo de los productos en las industrias, lo que produce una menor cantidad de desechos a largo plazo y promueve la reducción del impacto negativo hacia el ambiente. En resumen, la creación de un sistema didáctico de automatización con un PLC Arduino impactará positivamente la formación de los futuros estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

Requerimientos y necesidades para el desarrollo del proyecto

Según ISO (2015), para una implementación exitosa mediante un análisis de las necesidades y requerimientos de un sistema se obtienen los siguientes:

- a. Se especifican las características, los atributos, los requisitos de funcionamiento y el rendimiento requeridos.
- b. Se especifican las limitaciones de diseño de un sistema y los medios para realizarlo.
- c. Se integra y se realiza la trazabilidad de los requisitos con respecto a lo que piden las partes interesadas.
- d. Se define una forma de verificación de que se satisfacen los requisitos del sistema.

Con estos puntos que se plantearon, se definen las partes interesadas del proyecto específico, cumpliendo con los lineamientos anteriores.

Tabla 1
Partes interesadas del proyecto

Número	Partes interesadas
1	Profesores del área eléctrica
2	Laboratorio Delta
3	Estudiantes de la Escuela de Ingeniería Electromecánica

Como se mencionó, de acuerdo con los interesados en la realización del proyecto, se define una lista de necesidades expresadas por todas las partes.

Tabla 2
Lista de necesidades por parte de los interesados

Número	Lista de necesidades
1	Profesores del área eléctrica
2	Facilitar la visualización práctica de un sistema de transferencia de calor
3	Permitir la inclusión de futuras aplicaciones
4	Estructura que se pueda alojar todos los componentes de manera ordenada
5	Simulación del modelo por medio de software e implementación física
6	Capacidad del sistema de funcionar correctamente con perturbaciones en los fluidos
7	Poseer una interfaz que permita visualizar el funcionamiento correcto del sistema

Para los requerimientos del sistema, se tiene como objetivo cumplir las necesidades que se plantearon. Esta lista de requisitos permite identificar los puntos necesarios acerca de lo que se debe hacer para que se satisfagan los requerimientos de los interesados y, de esta forma, mantener un enfoque en las tareas por cumplir y resolver el problema que se planteó. El planteamiento de los requerimientos se presenta según el siguiente formato:

Tabla 3
Formato textual para cada requerimiento

Requerimientos críticos	Requerimientos importantes	Requerimientos deseados
El sistema deberá...	El sistema debería...	El sistema podría...

Fuente: Montero Jiménez y Vingerhoeds, 2019.

También se dividen en cuatro segmentos según cada requerimiento, los cuales son: funcionales (F), comportamiento (B, Behavior), estructurales (S, Structure) y experiencia (E). En la Tabla 4 se muestran los requerimientos del sistema de acuerdo con su formato y el segmento al que pertenecen.

Tabla 4
Lista de requerimientos de las partes interesadas

Tipo	Requerimientos de sistema
F1	El sistema deberá registrar las mediciones de los sensores de temperatura (termistores)
F2	El sistema deberá contar con un procesador programable que reciba la información de las mediciones
F3	El sistema deberá controlar la corriente en los módulos Peltier de acuerdo con los valores detectados en los sensores de temperatura
F4	El sistema deberá detener las alimentaciones en caso de emergencia
F5	El sistema debería tener una interfaz para visualizar y verificar los datos medidos
B1	El sistema deberá interactuar con el controlador a tiempo real
S1	El sistema debería tener una estructura que lo soporte de manera adecuada
S2	El sistema deberá contar con componentes que soporten fluidos a temperaturas de 5° a 60 °C
S3	El sistema deberá ser sellado para que no sucedan fugas del fluido

S4	El sistema podría tener una estructura que facilite el reemplazo de componentes
E1	El sistema debería tener una interfaz amigable con los usuarios
E2	El sistema podría tener un sistema de alarmas que se activen según las temperaturas

Estos requerimientos se formulan de manera general para el sistema completo. Los componentes específicos se presentan en cada capítulo durante su respectivo desarrollo.

Objetivo general

Diseñar un sistema didáctico que se basa en termofluidística, compuesto por sensores y actuadores, que sea controlado por Arduino de acuerdo con los requerimientos del Laboratorio Delta de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el funcionamiento y la composición del sistema didáctico.

Medidor de éxito: sistema definido según las necesidades que se plantearon.

2. Diseñar un sistema de transferencia de calor, por medio de líquido e intercambiadores de calor, con sensores y actuadores que sea controlado por un Arduino.

Medidor de éxito: un sistema práctico simulado con cada uno de los componentes y sus funciones específicas.

3. Elaborar un presupuesto detallado necesario para la implementación del sistema de termofluidística.

Medidor de éxito: lista de precios de cada elemento según la selección previa.

4. Integrar el sistema de manera correcta con cada uno de sus componentes.

Medidor de éxito: estación del sistema didáctico funcional.

Justificación

La importancia de realizar este proyecto se fundamenta en una serie de razones que influyen de gran manera la formación de las personas estudiantes. La automatización en la industria ha crecido muy rápidamente, lo que hace que ahora las personas discentes necesiten habilidades prácticas en estas tecnologías y poder contribuir con su empleabilidad. Además, este sistema requiere de automatización, sino también del uso de sensores y monitoreo de variables según la configuración que se vaya a programar en el PLC Arduino.

La falta de este tipo de sistemas afecta principalmente a las personas estudiantes de la institución, específicamente de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, ya que limita la competitividad de la universidad. Por otro lado, los futuros cursos que impartirá la Escuela de Ingeniería Electromecánica no contarán con equipos que representen la tecnología actual que se utiliza en las industrias. Además, por la misma razón, las empresas dependen de la capacitación de los profesionales, por lo tanto, enfrentarán dificultades para encontrar talento en el ámbito nacional.

La solución propuesta es apropiada para proporcionar una comprensión práctica de los desafíos actuales en el ámbito de tecnología. La versatilidad, capacidad y accesibilidad del sistema permiten que la transición de la educación universitaria y el entorno laboral fluya al mismo nivel de conocimiento requerido. Este tipo de PLC Arduino, por ser muy flexible, también permite desarrollar una amplia gama de distintas funciones y actualizarse según las necesidades del momento.

Viabilidad

El proyecto se desarrolla junto con el Laboratorio Delta de la Escuela de Ingeniería Electromecánica. Se busca realizar la compra de elementos como sensores, actuadores y del PLC Arduino para lograr un sistema completo que permita tener varias variables programables y distintos usos a largo plazo. Además, se busca que la misma Escuela de Ingeniería Electromecánica asigne un presupuesto en el momento de tener el sistema diseñado y listo para implementarse. Al programarse por medio de un PLC Arduino, esto reduce mucho los costos, ya que al ser un *software* de libre uso, no se necesita ningún tipo de licencia para renovar y el costo de adquisición inicial también es menor en comparación con otros PLC en el mercado.

Metodología

En este apartado se especifican las actividades por realizar para cumplir de manera adecuada cada objetivo que se planteó.

Tabla 5

Metodología por seguir

Objetivo específico	Actividad por realizar	Resultado
1. Caracterizar el funcionamiento y la composición del sistema didáctico.	Requisitos del sistema. Selección de elementos necesarios. Pruebas de sistema preliminar.	Sistema definido según las necesidades que se plantearon.
2. Diseñar un sistema de transferencia de calor, por medio de líquido e intercambiadores de calor, con sensores y actuadores que sea controlado por un Arduino.	Diseño preliminar del sistema. Simulación en Matlab para comprobar funcionamiento	Un sistema práctico simulado, con cada uno de los componentes y sus funciones específicas.

3. Elaborar un presupuesto detallado necesario para la implementación del sistema de termofluidística.	Investigación de precios de los componentes. Presupuesto con componentes seleccionados.	Lista de precios de cada elemento según la selección previa
4. Integrar el sistema de manera correcta con cada uno de sus componentes.	Adquirir todos los elementos del sistema. Ensamblaje del sistema completo. Pruebas del sistema final.	Estación del sistema didáctico funcional.

Alcance

El proyecto consiste en realizar la implementación de un sistema didáctico para los futuros cursos de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, enfocado en mantener los espacios de aprendizaje actualizados con la tecnología reciente. Este sistema tiene como meta establecer una estación en la que se disponga de un sistema de transferencia de calor, en el que se incluyan sensores y actuadores que midan distintas variables, controlados por un PLC Arduino. Esta configuración permite programar el PLC Arduino de diferentes maneras y así se tiene un sistema práctico en el cual se pueden demostrar aplicaciones del área eléctrica, mecánica y de programación.

Limitaciones

Al momento de realizar la compra de los componentes necesarios para la implementación del sistema se tiene como limitante el tiempo de entrega de estos. Por lo tanto, se planea llevar a cabo todo proceso de compra con un tiempo razonable, entre uno a dos meses antes, en el que en caso de atrasos no se vea afectado el proyecto.

Otra dificultad prevista son los recursos económicos para implementar el sistema, ya que, según las marcas de los productos y del tipo de sensores y válvulas que se seleccionen, puede

exceder el presupuesto adquirido. Por lo tanto, se realiza una gestión del presupuesto de la manera más detallada posible y solo se da prioridad a los componentes esenciales del sistema.

Capítulo II

Marco teórico

Sistemas

Un sistema se define como una representación de un dispositivo o un conjunto de ellos que existen en el mundo real. Por lo general, el estudio de estos sistemas consta de cuatro componentes distintos: modelado, descripción teórica matemática, análisis y diseño. Para desarrollar uno de estos sistemas se requiere un alto conocimiento en el sistema específico y en sus rangos de operación. Cuando se crea el modelo, se procede con la descripción teórica de las variables físicas (Giraldo y Giraldo, 2019).

Sistema de control

Un sistema de control tiene señales de entrada, de salida y un procesador interno que recibe y envía estas señales. Un sistema de control que no puede ajustar las señales recibidas o a sí mismo se llama sistema de lazo abierto. En el caso de que el sistema se controle por medio de varios sistemas que envían datos al mismo tiempo que reciben, generando así una respuesta que afecta al sistema, se llaman sistemas de lazo cerrado (De Iaco Veris y De Iaco Veris, 2021).

Un sistema de lazo cerrado utiliza sensores, actuadores y sistemas de computación para detectar errores y así enviar señales de respuesta en el momento en el que se necesiten. Estos sistemas no necesitan una calibración para funcionar en una condición de manera específica (De Iaco Veris y De Iaco Veris, 2021).

Control proporcional integral derivativo (PID)

El control proporcional integral derivativo es un sistema de control retroalimentado que siempre busca tener una variable en un punto deseado, realizando ajustes continuos y en tiempo real para mantener esa posición deseada dependiendo del caso (Borase *et al.*, 2021). El PID tiene tres algoritmos principales que consisten en el proporcional, que se encarga de responder a la diferencia entre los valores deseados y el actual. El integral, que guarda la información de los errores del pasado en un periodo. Por último, está el derivativo, que toma en cuenta la tasa de cambio de los errores. Es decir, si se produce un error a alta velocidad, este proporciona una señal para reducir la inestabilidad (Borase *et al.*, 2021).

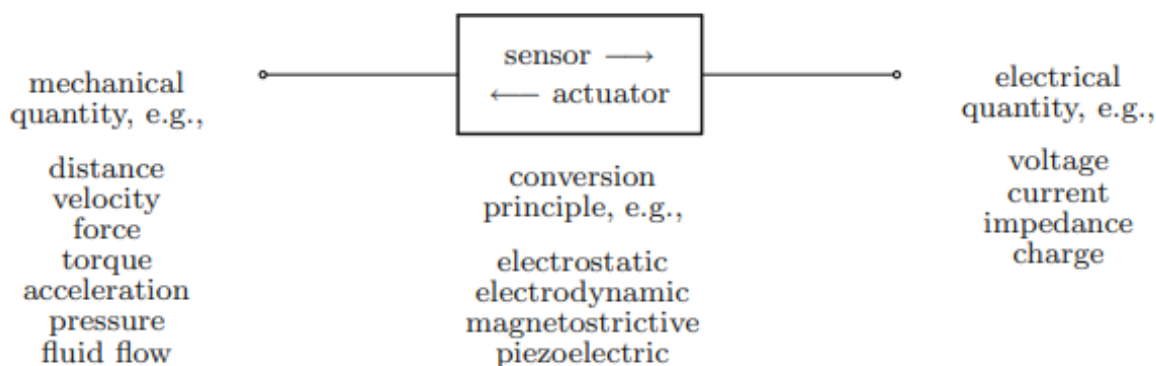
Sensores y actuadores

Los sensores y actuadores desempeñan un rol muy importante en varias aplicaciones prácticas. Los sensores convierten el tipo de medición realizada en un valor medido. Las mediciones son el dato de entrada y el valor medido, la salida de los sensores. Estos transforman usualmente los datos de entrada, que son mecánicos, en datos de salida eléctricos (Rupitsch, 2019).

Por otro lado, los actuadores convierten las señales eléctricas en datos de índole mecánica. Funcionan de manera opuesta a los sensores; los actuadores tienen como dato de entrada el dato eléctrico, por ejemplo, voltaje eléctrico, y como dato de salida datos mecánicos, como una cantidad de fuerza aplicada. En la Figura 2 se puede ver un diagrama del funcionamiento de ambos (Rupitsch, 2019).

Figura 2

Conversión típica de datos de entrada y salida de sensores y actuadores



Fuente: Rupitsch, 2019.

Arduino

Arduino es una empresa y comunidad que se define en la interacción de usuarios de *hardware* y *software* de libre acceso. Estos fabrican placas que tienen una función basada en microcontroladores. Dichas placas se conocen como módulos de Arduino y se utilizan en el desarrollo de aplicaciones de microcontroladores, de una manera más económica. Además, por su distintivo precio y su código libre, por medio del Arduino IDE, se pueden realizar experimentos innovadores (Kondaveeti *et al.*, 2021).

El Arduino existe en varios tipos. Los típicos que se encuentran son el Arduino Uno, Arduino Due, Arduino Mega y Arduino Leonardo. Estos se utilizan en distintos campos de la tecnología, como el diseño de sistemas, controladores, comunicación de *hardware*, investigación oceanográfica, entre otros (Kondaveeti *et al.*, 2021).

Controlador Lógico Programable (PLC)

Los PLC han sido una parte fundamental en el avance de la automatización. Uno de sus roles principales ha sido ser el controlador directo de los procesos y se envía retroalimentación a

componentes por medio de las señales que recibe. La arquitectura general tiene un *hardware* de control que usualmente ya viene integrado y el *software* de control se maneja a través de un sistema de operación y comunicación estandarizada (Mellado y Núñez, 2022).

Los principales subsistemas de un PLC son un motor de ejecución para ejecutar los programas de control, la base de datos para guardar los tiempos en funcionamiento, el sistema de interacción con la persona usuaria y las salidas y entradas del sistema (Mellado y Núñez, 2022).

Transferencia de calor

La transferencia de calor es el movimiento de energía térmica debido a una diferencia entre la temperatura de dos espacios. Cuando existe una diferencia de temperatura en un medio o entre dos medios, sucede una transferencia de calor.

Existen tres tipos de transferencia. La transferencia de calor por conducción se refiere a cuando la transferencia ocurre a través del medio. De otra manera, la convección sucede cuando ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento a diferentes temperaturas. Por último, el tercer tipo es por medio de radiación, cuando hay ausencia de un medio y existe una transferencia de calor neta por radiación entre dos superficies.

Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para la transferencia de calor de un fluido a otro en distintas configuraciones. Su función es primordial en distintos procesos que utilizan las industrias; las áreas en las que se aplican van desde la generación convencional de energía hasta los procedimientos de fabricación en industrias químicas. Algunos de los diferentes tipos que se usan son la configuración en espiral, de placas y de carcasa y tubos, entre otros. La

eficiencia de estos y su selección adecuada, según el proceso, tienen un gran impacto en la rentabilidad de su uso en las industrias (Mohamed Nazim *et al.*, 2023).

Válvulas

Las válvulas de control permiten modificar el flujo de un fluido, por medio de un actuador mecánico controlado por un sistema de control. Estas válvulas se pueden abrir, cerrar o colocar de manera parcial y así ajustar la cantidad de flujo de un sistema (Siraskar, 2021).

Efecto Peltier

Este efecto consiste en la liberación de calor en una de las uniones de una termocupla y en la absorción de calor en la opuesta. Esto ocurre cuando fluye una corriente eléctrica en el circuito. El efecto Peltier se utiliza en análisis térmicos, en la calibración de calorimetría y en la compensación del flujo de calor. Este fenómeno se considera un fenómeno termoeléctrico (Drebushchak, 2008).

Módulo Peltier

Los módulos de Peltier son dispositivos electrónicos que tienen la función de una bomba de calor. Este funciona al aplicar un voltaje bajo en DC al módulo; con esto, una de las superficies comienza a enfriarse y otra se calienta. Si se invierte la polaridad de la fuente de alimentación, el calor también se mueve en la dirección contraria. Por lo tanto, este dispositivo puede usarse tanto como calentador como enfriador (Alaoui, 2011).

Matlab y Simulink

Matlab es un lenguaje de computación técnico; este integra la visualización, programación y cálculo en un solo lugar de fácil manejo. Los problemas y soluciones se presentan en notación matemática y entre sus aplicaciones más comunes están:

- Matemática y cálculos.
- Desarrollo de algoritmos.
- Modelaje, simulación y prototipado.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Gráficos científicos e ingenieriles.
- Desarrollo de aplicaciones, incluida la construcción de interfaces gráficos de usuario.

El nombre de Matlab proviene del término en inglés *matrix laboratory*, que se refiere a un laboratorio de matrices. Esto se debe a que originalmente fue programado para proporcionar acceso a programas de matrices, representando en ese momento la última generación en aplicativos para el cálculo de matrices (Matlab, 2012).

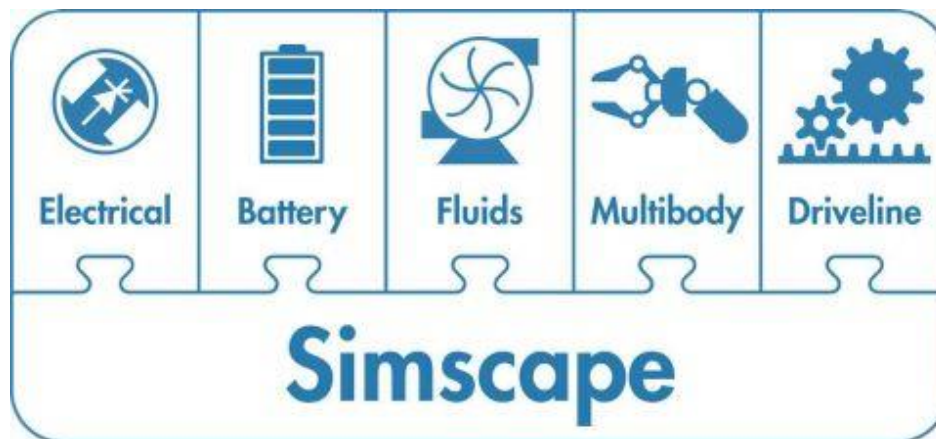
Simulink, por otro lado, es un programa integrado en Matlab; es un sistema interactivo para simular sistemas dinámicos no lineales y lineales. Este permite modelar un sistema seleccionando diagramas de bloques y manipulándolos de manera dinámica. Además, puede funcionar de forma lineal, no lineal, en tiempo continuo, en tiempo discreto, multivariable, entre otros (Matlab, 2012).

Simscape

Esta extensión de Simulink permite la creación rápida de modelos de sistemas físicos. Estos modelos se construyen con base en componentes físicos con conexiones físicas, todo integrado mediante diagramas de bloques y otras características del modelado. Con lo descrito, se logran modelar sistemas como motores eléctricos, rectificadores de puente y actuadores hidráulicos, entre otros.

Además, mediante este programa, se pueden desarrollar sistemas de control y de pruebas de nivel de rendimiento. Se tiene la posibilidad de parametrizar los modelos utilizando las propias variables y expresiones de Matlab, lo que permite combinar los modelos con otros ambientes de simulación.

Figura 3
Aplicaciones de Simscape



Fuente: Simscape, s. f.

Motores DC sin escobillas

Los motores DC sin escobillas presentan una mejor eficiencia que las máquinas de inducción, los motores de una sola fase tienen un precio mucho menor que los trifásicos y son muy utilizados en proyectos de baja potencia, lo que permite un gran rendimiento a un bajo

costo. Estos se pueden utilizar en bombas de agua a baja potencia. Además, con estos motores conectados desde 6 a 12 V se obtiene una buena eficacia a cargas de 1800 r. p. m. y con un torque de 2 Nmm (Hong *et al.*, 2011).

Capítulo III

Caracterización del sistema

En este apartado se tiene como objetivo lograr una noción acerca de cómo funcionarán los componentes por utilizar y, a la vez, el tipo de sistema que se diseña luego. Se debe entender el funcionamiento para asignar los parámetros correctos a la hora del modelado del sistema y, para esto, hay que caracterizar algunos elementos por usar y así determinar cuáles valores son necesarios para obtener los resultados que se esperan.

Propuesta de componentes y modo de funcionamiento

Para iniciar con el desarrollo del sistema, se necesita primero tener una propuesta de diseño del funcionamiento de este. Para dicho sistema de transferencia de calor se necesitan los siguientes componentes:

Tabla 6

Lista preliminar de componentes

Componentes
Módulo de Peltier
Intercambiador de calor
Medio para la transferencia de calor
Fluido refrigerante
Sensores de temperatura
Bombas centrífugas
Tanques de almacenamiento

Tuberías

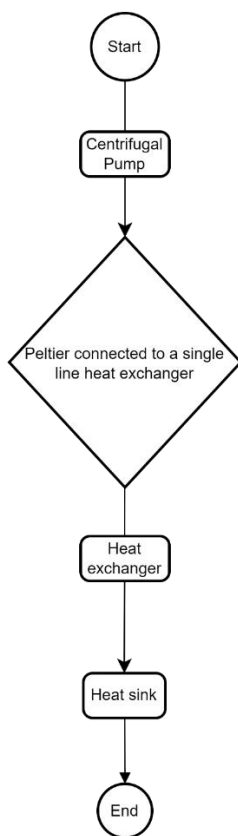
Disipador de calor

Sensores de caudal

De la lista anterior, se desarrolla el sistema con estos componentes. Esto permite diseñar un modelo de transferencia de calor en el cual se tiene un subsistema para calentar o enfriar el agua mediante el Peltier conectado a un intercambiador de calor de una sola línea y con esto lograr un lazo en el subsistema.

Figura 4

Subsistema para calentar y enfriar el refrigerante

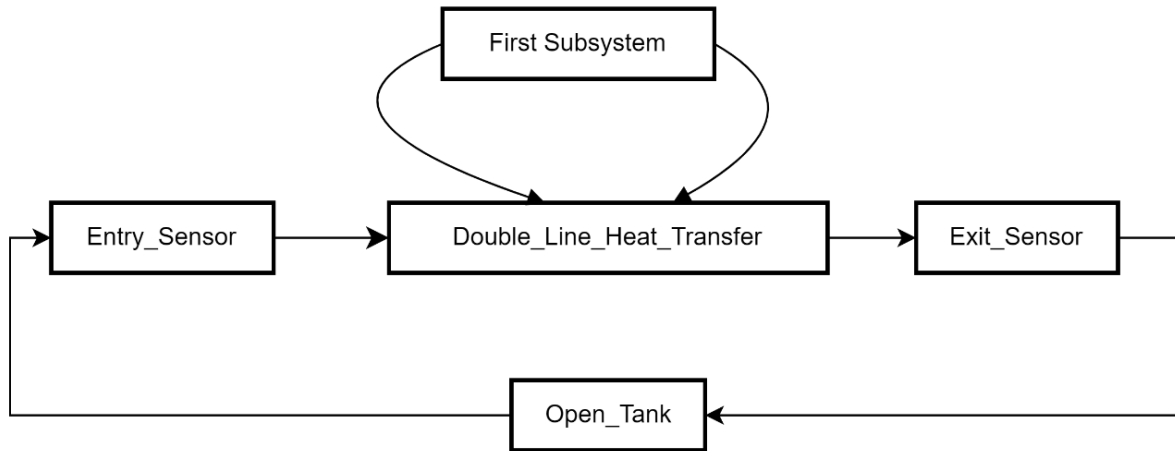


Fuente. Elaboración propia.

El otro subsistema estaría compuesto por un intercambiador de calor de dos líneas. En este la alimentación es el primer subsistema mencionado y para el líquido que absorbe la energía habría un sistema de alimentación de un tanque en este se pudiera variar la temperatura.

Figura 5

Sistema principal de transferencia de calor

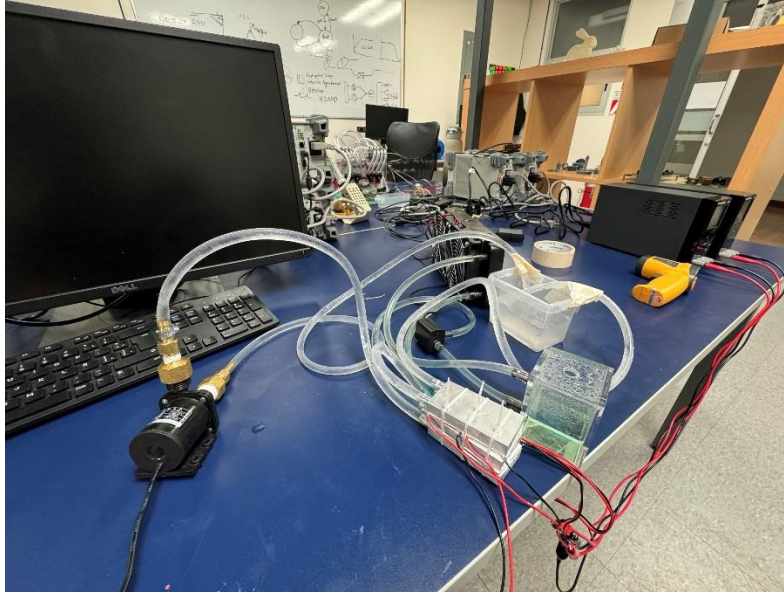


Con este sistema que se planteó se ofrece una solución para el monitoreo adecuado de la temperatura de un fluido después de su paso por un intercambiador de calor. Este proceso se realiza de manera eficiente y controlada, gracias a la combinación de diversos tipos de componentes diseñados y a un sistema de control funcional.

Sistema preliminar

Con base en la propuesta anterior y los componentes, se realizó un sistema preliminar para analizar la transferencia de calor por parte de los módulos de Peltier a los intercambiadores. Este sistema se construyó de manera física para comprobar los valores aproximados del mínimo y máximo de la temperatura.

Figura 6
Sistema de transferencia preliminar para pruebas



El sistema que se puede ver en la Figura 6 funciona de manera similar al mencionado previamente. Este consta de un circuito térmico, el cual está compuesto de un disipador de calor, una bomba centrífuga para la circulación, un intercambiador de calor y un tanque de almacenamiento tipo reservorio para el líquido. Este circuito se ubica en el centro de dos intercambiadores de calor adicionales y en el extremo opuesto de los módulos Peltier para cumplir con su función de circuito disipador.

Para los componentes principales del sistema se encuentra una configuración similar: otra bomba centrífuga que funciona como fuente constante de flujo, otro tanque de almacenamiento para el líquido del sistema, dos intercambiadores de calor, cada uno en contacto con los módulos Peltier y sensores de temperatura en la salida del último intercambiador y uno en el tanque de alimentación. Además, se tienen las fuentes de alimentación para los dos circuitos, las cuales permiten el funcionamiento de las bombas y dos fuentes de voltaje para cada conjunto de módulos Peltier.

Este sistema permite gestionar la temperatura, facilita un intercambio de calor dentro del rango deseado entre los componentes y garantiza un control de la temperatura consistente, manteniendo el rendimiento incluso con diferentes condiciones de operación.

Operación del sistema

En cuanto al funcionamiento del sistema preliminar, se destacan los módulos Peltier que desempeñan el papel de componente principal del sistema como generadores de calor. Estos módulos están adheridos de manera exacta, por un lado, a los intercambiadores de calor del sistema principal y, por el otro, al intercambiador de calor del subsistema. Este último tiene la función específica de disipar el calor generado por los lados opuestos de los módulos Peltier y regular su temperatura. Además, opera mediante la regulación de un lazo cerrado, donde circula un fluido continuamente. Este fluido pasa por un disipador, elimina el exceso de calor y se devuelve a su tanque de almacenamiento inicial, todo esto gracias a una bomba centrífuga, manteniendo un control de temperatura fijo en el circuito disipador.

En lo que respecta al sistema principal, este también es un lazo cerrado, en el cual una bomba hace que circule un fluido por dos intercambiadores de calor y vuelva a un tanque de almacenamiento. Estos intercambiadores de calor están conectados a los módulos Peltier, con los cuales se regula la temperatura del sistema según la corriente con la que se energizan los módulos Peltier. Esto se hace de acuerdo con los sensores, en la salida del intercambiador como temperatura final y el sensor en el tanque como inicial.

En lo que respecta al circuito térmico principal, este opera como un circuito cerrado, como el del subsistema, donde una bomba centrífuga impulsa el fluido a través de dos intercambiadores y luego retorna al tanque de almacenamiento del líquido. Estos

intercambiadores de calor son componentes esenciales para la regulación térmica; están conectados a los módulos Peltier, los cuales permiten la gestión y estabilidad de la temperatura del sistema.

La temperatura se regula de manera precisa mediante un sistema de retroalimentación controlado por un sensor que se ubica entre el tanque y los intercambiadores de calor, como punto de medición principal. Este sensor monitorea la temperatura inicial del fluido para controlar la regulación según la temperatura que se establezca como nominal. Dicho componente es crucial en el funcionamiento del sistema, ya que proporciona información en tiempo real sobre el estado térmico de este, lo que permite ajustes precisos y mantiene la temperatura en su rango deseado.

Esta configuración basada en un sensor y retroalimentación, controlado mediante una programación, permite un control térmico eficiente y confiable, lo que se observa en el rendimiento óptimo del sistema en distintas condiciones de operación. Además, la integración de estos tipos de componentes proporciona una mayor estabilidad al sistema, reduce la variabilidad no deseada en la temperatura y mantiene una buena capacidad de adaptarse a los cambios en las cargas térmicas.

Se realizaron pruebas, con el fin de obtener una estimación precisa de las temperaturas que puede alcanzar el sistema en diversas condiciones. Estas representan un paso crucial para desarrollarlo y modelarlo, ya que los valores e información que proporcionan definen las condiciones en las cuales funcionará el sistema final.

A continuación, se detallan los datos que se obtienen, que ofrecen una vista profunda de las temperaturas registradas y de la duración que toma realizar los cambios de temperatura con los intercambiadores de calor:

Tabla 7
Prueba de temperatura mínima del sistema preliminar

Dato por medir	Medición
Temperatura promedio del sistema de disipación (°C)	25
Temperatura inicial de prueba para frío (°C)	20
Temperatura final prueba frío (°C)	8,5
Duración de la prueba (min)	35

Tabla 8
Prueba de temperatura máxima del sistema preliminar

Dato por medir	Medición
Temperatura promedio del sistema de disipación (°C)	22
Temperatura inicial de prueba para calentar el sistema (°C)	20
Temperatura final prueba calor (°C)	55
Duración de la prueba (min)	20

La información proporcionada en la Tabla 7 y en la Tabla 8 permite conseguir los valores mínimos y máximos de temperatura en el sistema preliminar. Estos permiten saber las capacidades operativas básicas del sistema durante su tiempo en marcha. Mediante estos resultados se comprueban los rangos de temperatura, ya que se mostró condensación en el mínimo, entre los cuales el sistema funciona, además, se establecen las limitaciones necesarias.

En la prueba de la temperatura mínima de la Tabla 7, con una temperatura inicial de 20 °C, se observa que el subsistema de disipación logra mantener una temperatura promedio de 25 °C, mientras que el sistema principal alcanza una temperatura de 8.5 °C después de un lapso de 35 minutos en operación. Con estos datos, se comprueba que se tiene una buena eficacia utilizando los módulos Peltier para refrigeración.

Por otro lado, en la prueba de temperatura máxima de la Tabla 8, con una temperatura inicial de 20 °C, se registraron los valores de temperatura promedio en el circuito de la disipación. Esta estuvo alrededor de 22 °C y en el sistema principal se alcanzó una temperatura final de 55 °C luego de 20 minutos de prueba. Dichos resultados demuestran la capacidad del sistema para generar y mantener temperaturas altas mediante el uso de la otra polaridad de los módulos Peltier.

En conjunto, ambas pruebas confirman el amplio rango de temperatura de operación, que va desde aproximadamente 8.5 °C hasta más de 55 °C. Este rango tan versátil de temperaturas comprobó la capacidad del sistema de adaptarse a una gran variedad de condiciones en las cuales se quiera poner en operación. Además, amplía la posibilidad de utilizar el sistema para variar temperaturas de manera didáctica, mediante la adición de una programación y un controlador específico.

Capítulo IV

Diseño del sistema

En este apartado se tiene como propósito utilizar los datos y características de los capítulos anteriores para lograr un modelado del sistema preliminar, tomando en consideración los aspectos operativos deseados para este. La primera parte consiste en la simulación del sistema utilizando el *software* Matlab, en el cual se grafica el comportamiento directo de la temperatura del tanque de reserva según los parámetros del intercambiador.

Modelado del sistema

Como se mencionó, el sistema de transferencia se simula utilizando el *software* Matlab mediante su extensión Simulink, en el cual se utilizan bloques de una librería llamada Simscape. Con esto se asegura que el sistema proporcione una funcionalidad adecuada. Por lo tanto, debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. Tener un rango de funcionamiento de 5 °C a 55 °C.
2. Tomar datos de la temperatura en la salida del intercambiador de calor.
3. Controlar los cambios de temperatura en el intercambiador según la temperatura deseada.

Esquema de modelado

La estrategia para seguir es como la que se utiliza en el sistema preliminar. Se necesita un sistema que permita obtener una temperatura constante mediante el control digital de una fuente de calor conectada con un intercambiador de calor, así como un flujo persistente proporcionado por una bomba centrífuga para que el líquido pase por el intercambiador de calor. Además, se debe contar con un sensor de temperatura en la salida del intercambiador de calor para que,

según las mediciones, se pueda variar la temperatura de la fuente principal de calor, todo esto por medio de un controlador.

Por parte del controlador, se define su funcionamiento con base en las mediciones de temperatura tomadas en el tanque, que son la inicial y la de la salida del intercambiador de calor que es la final. Con esto se programa un controlador PID según lo requerido.

Componentes por utilizar

Bomba centrífuga

Para la simulación de la bomba centrífuga, se selecciona una fuente de flujo constante del apartado llamado *líquido térmico* de Simscape. Esta fuente permite establecer un flujo específico de manera persistente que representa el modo de operación de la bomba centrífuga. Al configurar este flujo, se logra instaurar un punto de referencia para la simulación, lo que da la posibilidad de que el sistema se pueda comportar y evaluar en distintas condiciones de operación y se ajusten los parámetros según sea necesario.

Figura 7

Simbología de fuente de flujo constante



Fuente: Simulink, s. f.

Tanque de almacenamiento

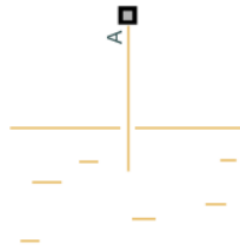
Para simular los tanques de almacenamiento del fluido en el sistema, se utiliza el bloque de reservorio de líquido térmico en Simulink de la librería Simscape. Este componente es

esencial, ya que provee al sistema un líquido constante con una temperatura inicial y una presión persistente. Lo más importante de este bloque es que se puede adaptar a las variaciones de temperatura que puedan suceder debido a las condiciones operativas del sistema. De manera similar a como se emplearon los tanques de almacenamiento en el sistema preliminar que abastecía continuamente el sistema de un líquido y podía variar sus condiciones iniciales, también se ajustaba junto con los cambios de temperatura como respuesta a las condiciones del sistema.

Al utilizar este bloque para simular la alimentación del sistema, se replica la función esencial de los tanques de almacenamiento en el sistema físico. Estos tanques no solo proporcionan un suministro constante de líquido, sino que también pueden dejarse influir por las características térmicas que cambian cuando el sistema está en marcha.

Figura 8

Bloque de reservorio de fluido



Fuente: Simulink, s. f.

Tuberías

Para la simulación de la tubería del sistema, se emplea el bloque de tubería de líquido térmico, que permite el modelado de fluidos a través del sistema de manera precisa. Este bloque ofrece una amplia flexibilidad en el momento de configurar parámetros importantes que influyen en el comportamiento de las tuberías y en cómo se comporta el fluido que pasa por esta. Además,

da la posibilidad de configurar la longitud de cada segmento de tubería entre componentes, lo que hace posible que el programa tome en cuenta las distancias físicas entre cada uno y las pérdidas correspondientes. Además, se puede especificar el diámetro de la tubería, lo que afecta directamente el flujo y la velocidad del fluido por medio de esta. Para este caso en específico, se utilizan tuberías de plástico con una longitud de 0.5 m y un diámetro de 0.5 in, lo que da la probabilidad de una función similar al sistema preliminar.

Por otro lado, aparte de los dos parámetros anteriores, este bloque también permite especificar el material de la tubería, el cual es crucial para que el programa tome en cuenta las propiedades térmicas correspondientes. Para este caso, se utilizan tuberías de vinilo; al tener estos detalles, la simulación se vuelve mucho más precisa y representa de manera exacta el comportamiento real del sistema. En resumen, este bloque da la posibilidad de crear una simulación detallada del transporte de fluidos a través de una tubería de un sistema.

Figura 9

Bloque de tubería de líquido térmico



Fuente: Simulink, s. f.

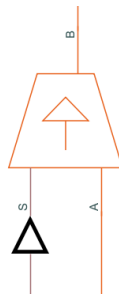
Módulos Peltier

Los módulos Peltier son dispositivos termoeléctricos que regulan la temperatura de su superficie en función de la corriente eléctrica que fluye por ellos. Esto los convierte en un

elemento fundamental para una aplicación en la cual sea necesario realizar cambios de temperatura constantemente y de manera que se pueda incrementar y disminuir. Para simular este funcionamiento en Simulink, se utiliza, con un enfoque más simplificado, un bloque de una fuente de calor controlada. De esta forma, el bloque replica de forma efectiva la respuesta térmica de un módulo Peltier, lo que permite el ajuste del diferencial de temperatura entre sus dos puertos. Esta simulación simplificada optimiza el sistema, logrando una representación con el mismo comportamiento de un módulo Peltier, pero sin la necesidad de modelos matemáticos, sino solo un dato de entrada que defina el diferencial de temperatura. Además, la simulación da la posibilidad de visualizar cómo se disipa la diferencia de calor en el subsistema de disipación, lo que facilita el análisis completo y detallado del sistema.

Figura 10

Bloque de fuente de temperatura controlada

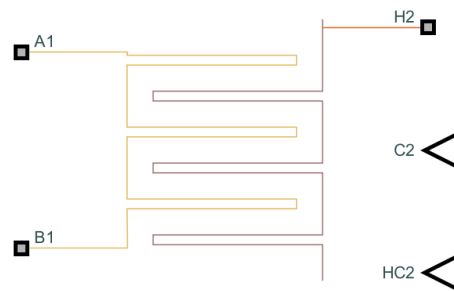


Fuente: Simulink, s. f.

Intercambiador de calor

El bloque de intercambiador de calor (líquido térmico) modela el enfriamiento y el calentamiento de fluidos mediante conducción a través de una pared delgada. Las propiedades de un líquido térmico se definen en el bloque de configuración del líquido térmico. El segundo fluido se especifica según lo que defina la persona usuaria y el componente que se conecte al puerto H2. El intercambio de calor entre los fluidos se basa en las propiedades de absorción de calor del líquido térmico.

Figura 11
Bloque de intercambiador de calor

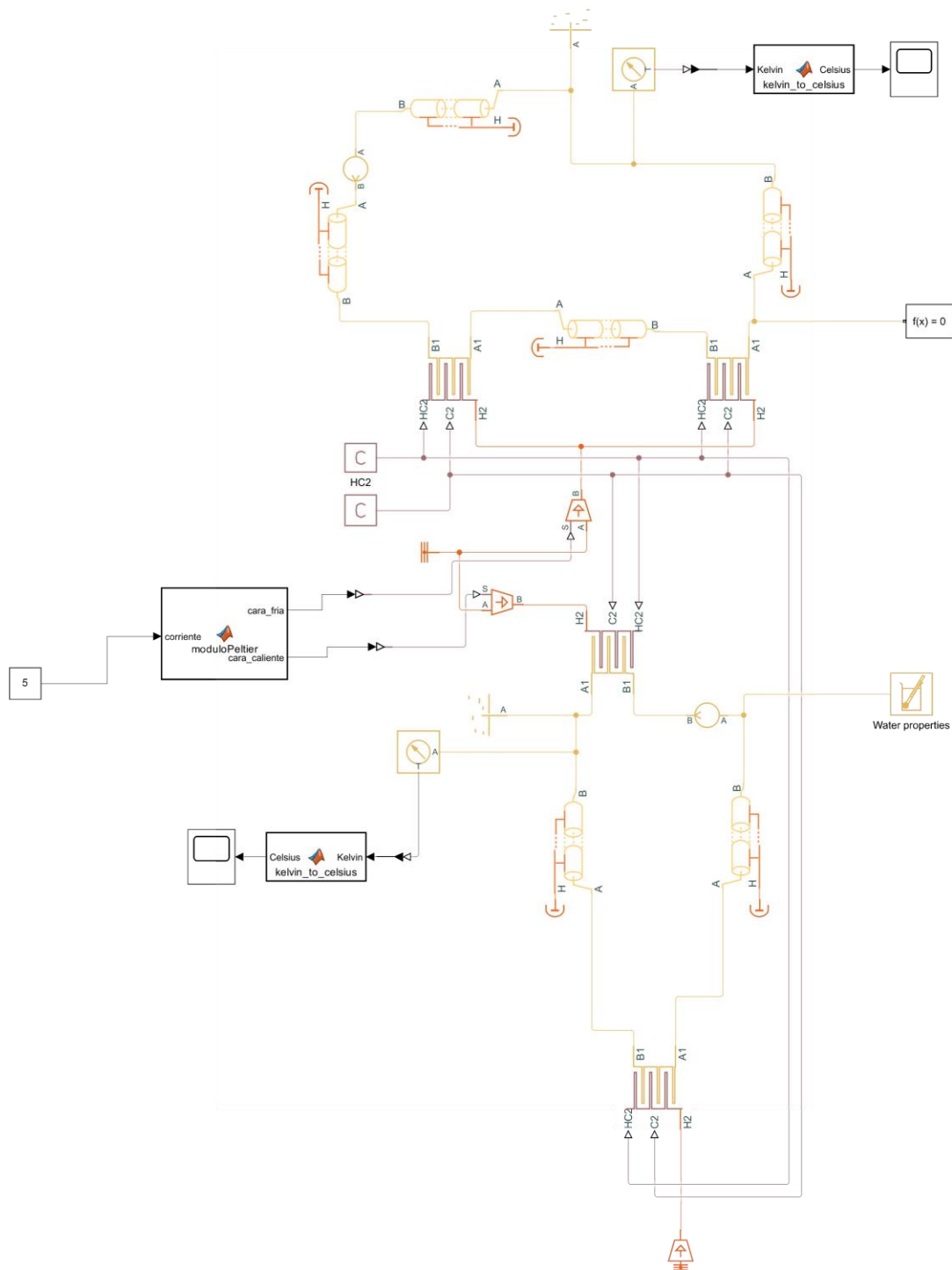


Fuente: Simulink, s. f.

Sistema final y pruebas

Mediante los bloques definidos se logra completar la simulación del sistema. Cabe aclarar que esta simulación es solo para comprobar el funcionamiento del sistema y no es una representación completamente real y altamente precisa de este.

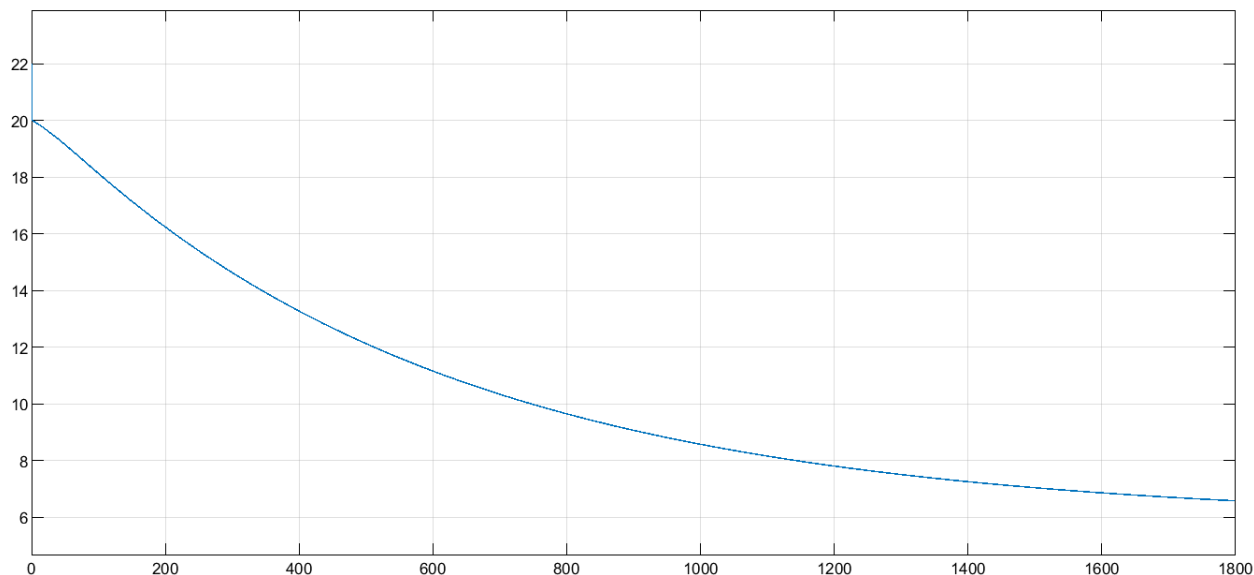
Figura 12
Sistema modelado completo



Con este sistema se realizaron las pruebas de enfriamiento y calentamiento del líquido con el bloque definido como los módulos Peltier.

Figura 13

Gráfico de temperatura (°C) vs. tiempo (s) para prueba de enfriamiento

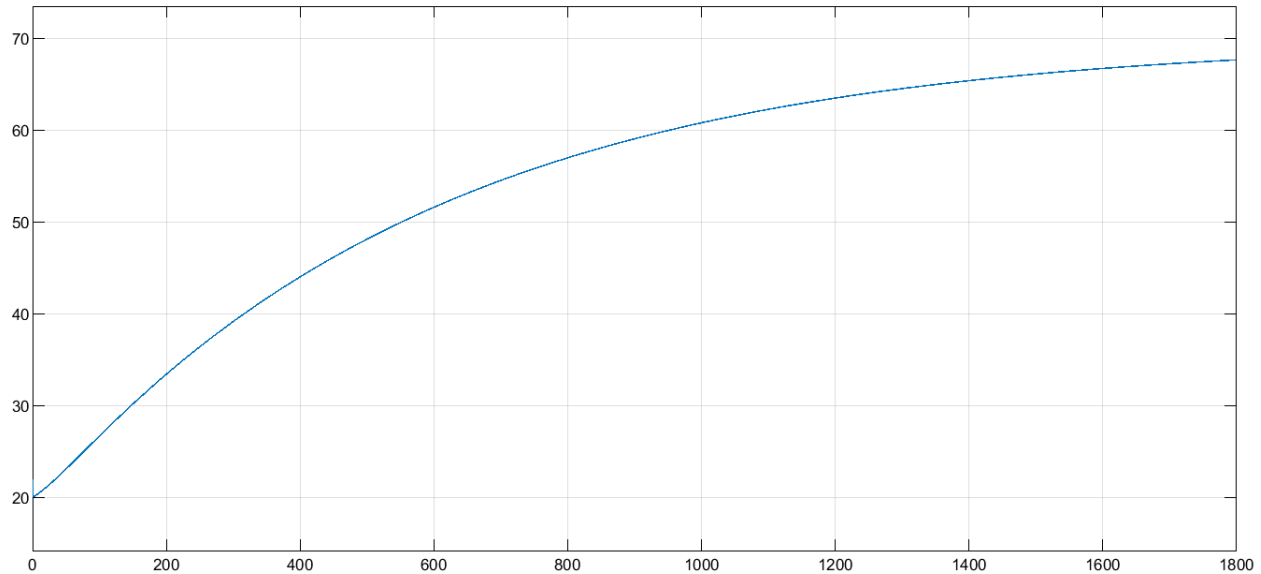


En la Figura 13 se muestra cómo se comporta el sistema cuando está en modo de enfriamiento. Al iniciar la prueba a aproximadamente 20 °C, los módulos Peltier logran llevar la temperatura del sistema a alrededor de 6 °C, en un lapso de 1800 segundos o 30 minutos.

Esto se muestra cómo una curva logarítmica en declive. Así, el inicio es donde se tiene el mayor cambio de temperatura de forma drástica y luego el tiempo en el que cambia la temperatura aumenta a medida que se alcanzan los límites más bajos de temperatura. Por ser una simulación, se toma esta cantidad de tiempo y se trata de llegar a los límites más bajos posibles; en este caso es probable que en el sistema final no se alcancen estas temperaturas ni se realicen pruebas de larga duración, como 30 minutos, por las capacidades físicas de lo que serían las bombas centrífugas.

Figura 14

Gráfico de temperatura (°C) vs. tiempo (s) para prueba de calentamiento



En la Figura 14 se muestra el comportamiento del sistema en el modo de calentamiento. Iniciando desde la misma temperatura de 20 °C, esta vez ocurre un cambio hasta alrededor de los 70 °C en los mismos 30 minutos. Lo anterior muestra la capacidad de los módulos Peltier de cambiar su temperatura a un punto bastante elevado.

La curva sigue el mismo patrón logarítmico de la anterior, con un incremento rápido de la temperatura al inicio y luego, al aumentar su tiempo, sube más la temperatura a medida que se acerca a temperaturas elevadas. De la misma forma, en el sistema final no se llegaría a estas temperaturas para mantener un estado óptimo de los componentes.

Capítulo V

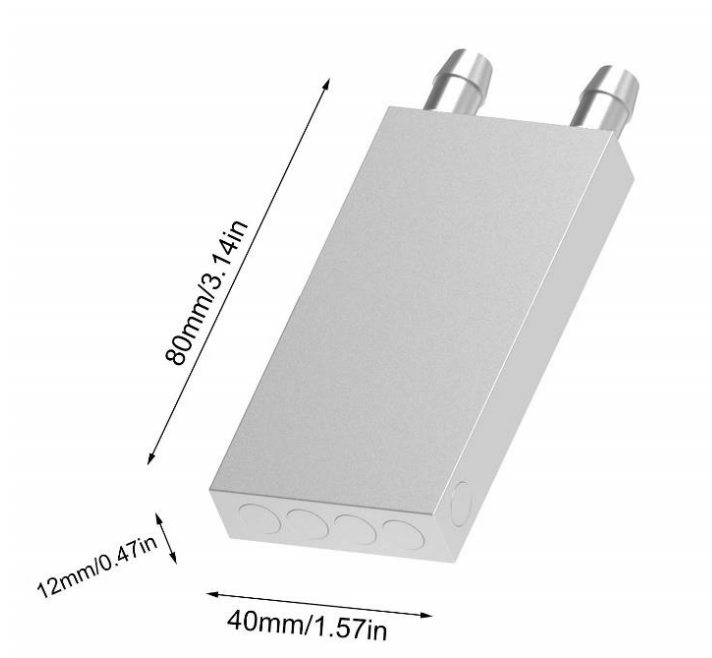
Lista de componentes

Intercambiador de calor

Como primer componente se seleccionaron los intercambiadores de calor. Para estos se eligieron unos que son bloques de refrigeración por agua de una aleación de aluminio de la marca Clixgs, diseñados con un canal en forma de M. Además, su bajo costo los convierte en la opción más viable; tienen un precio de \$12.99 por cada dos unidades. Asimismo, como están compuestos por una aleación de aluminio, ofrecen una ventaja frente a otros materiales que tienen un menor coeficiente de conductividad térmica y regulan de manera efectiva la transferencia de calor.

Figura 15

Intercambiador de calor Clixgs



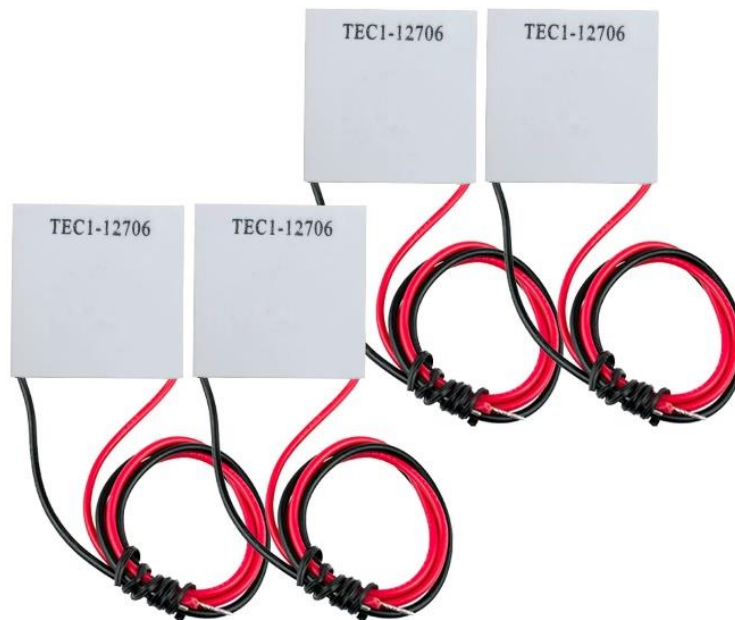
Fuente: Amazon, s. f. b.

Estos bloques vienen con un canal en forma de M para obtener una mayor área de superficies para la transferencia de calor entre el fluido y las paredes. Dicho diseño permite aumentar la eficiencia de todo el sistema y cumple con las necesidades del proyecto en cuestiones de compatibilidad, costo y aplicación.

Módulo Peltier

En el momento de elegir los módulos Peltier, se seleccionaron los del modelo TEC1-12706, los cuales son una solución muy compatible con el sistema y con los requerimientos de temperatura establecidos. Estos dispositivos vienen en una placa cuadrada de 40 mm de ancho y alto, lo que permite que encajen de manera perfecta con los intercambiadores mencionados. De esta forma, se garantiza una transferencia de calor uniforme y constante en el sistema.

Figura 16
Módulo Peltier



Este modelo permite una oscilación de temperatura entre aproximadamente $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que posibilita tanto el enfriamiento como el calentamiento de manera controlada a altas velocidades. Esta capacidad para mantener una temperatura según la corriente que se le proporciona es fundamental para un sistema de control de temperatura constante y preciso por medio de un Arduino. Además, este tiene un precio de \$14.99 por 4 módulos, lo que lo hace accesible como componente primordial para el sistema que se planteó.

Bomba centrífuga

La selección de la bomba centrífuga de marca Q-BAIHE, de modelo ZC-T40-12 V-DC, se realizó con base en su capacidad de proporcionar un caudal de 10 l/min de manera constante, asegurando el flujo estable por medio de los intercambiadores y el resto del sistema. Además, su gran rango de temperatura de funcionamiento, que va desde los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, hace que sea adecuada para el rango de temperatura en el que funcionará el sistema y así tener un rendimiento óptimo en este. Asimismo, al ser una bomba centrífuga magnética sin escobillas, el ruido generado durante su funcionamiento es muy bajo, lo cual es deseable en ambientes como laboratorios, como en los que se utiliza el sistema.

Figura 17
Bomba centrífuga



Fuente: Amazon, s. f.f.

Por último, el precio de esta bomba es de \$23.23 en Amazon, lo cual la hace realmente accesible. Esta relación de precio y compatibilidad hace que sea el componente indicado en el sistema.

Pasta térmica

La pasta térmica se seleccionó para optimizar la transferencia de calor entre el módulo Peltier y las caras de los intercambiadores de calor. La elección fue de la marca SparkFun, modelo PRT-09599. Esta posee un coeficiente de conductividad térmica de $1.172 \text{ W}/(\text{mK})$; también ofrece una amplia temperatura de operación que varía desde $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Lo anterior permite que se utilice en el sistema que se planteó a la perfección, garantizando un rendimiento óptimo y constante durante su uso. Por último, su precio es de \$5.95, lo que la hace accesible para el uso que se necesita (Micro JPM, s. f.b.).

Sensor de caudal

El sensor de caudal modelo YF-S201 se seleccionó debido a su afinidad con el sistema definido. Entre sus capacidades está su rango de temperatura de operación, que va desde $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que garantiza su funcionamiento en las condiciones previstas para el sistema. Además, su rango de medición de caudal va desde 1 l/min hasta 30 l/min , asegura un monitoreo preciso del flujo del sistema, el cual se proporciona por las bombas centrífugas mencionadas.

Figura 18
Sensor de caudal



Fuente: Micro JPM, s. f.e.

La compatibilidad de la alimentación y la forma de leer los datos medidos mediante un controlador Arduino añade valor a la selección de este sensor para crear una integración más eficiente del sistema. Además, cuenta con un precio asequible de \$11.95 en el país.

Sensor de presión

La elección de este sensor de presión se basó en su capacidad para monitorear el funcionamiento y la presión del sistema. Este también puede integrarse con un controlador Arduino, lo que facilita la implementación y la adquisición de los datos medidos. Además, por su capacidad para realizar las mediciones en un sistema con fluidos, asegura su compatibilidad en el entorno que se planteó. Su precio de \$15.99, su alta precisión y sus capacidades de operación logran subsanar su costo.

Figura 19
Sensor de presión



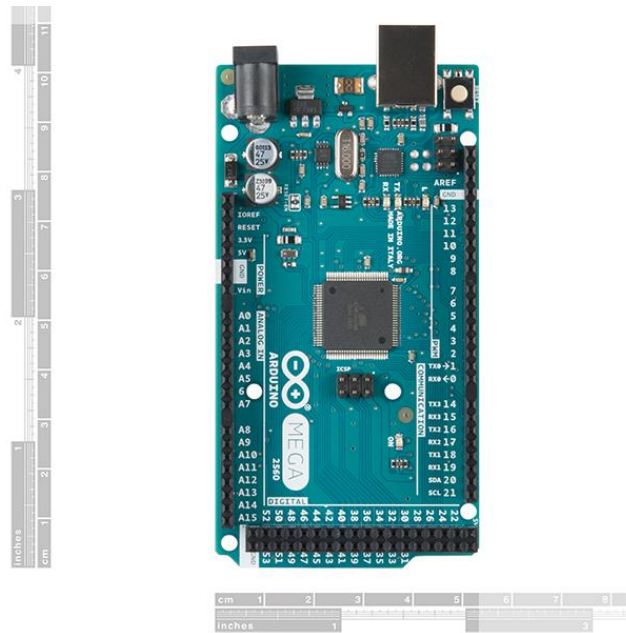
Fuente: Amazon, s. f.g.

Arduino Mega

Se eligió un Arduino Mega por su gran cantidad de pines para entradas y salidas digitales y analógicas, lo que provee una mayor capacidad de memoria en comparación con un Arduino Uno. Estas ventajas permiten conectar una amplia cantidad de sensores o dispositivos electrónicos de medición y control, lo que ocasiona una mayor utilidad en el sistema que se planteó y, de esta forma, se puede tener solo un controlador para todo el funcionamiento en

general. Sus capacidades, como su velocidad de reloj de 16 MHz, dan la posibilidad de un control preciso y una rápida respuesta a las entradas de los varios sensores que se utilizan en conjunto. Este tiene un precio de \$68.95.

Figura 20
Arduino Mega



Fuente: Micro JPM, s. f.a.

Radiador

Se selecciona un radiador de enfriamiento para agua de la marca DIYhz, el cual cuenta con unas dimensiones de 240 mm x 120 mm. Este está equipado con dos ventiladores que disipan el calor generado y así garantizan un control preciso de la temperatura del subsistema. Dicho radiador ofrece una excelente capacidad de enfriamiento por un costo de apenas \$28.99.

Figura 21
Radiador de enfriamiento para agua



Fuente: Amazon, s. f.i.

Sensor de temperatura

Se selecciona el sensor de temperatura de la marca Alphacool; este tiene un diseño que se acopla con roscas de G1/4", que se ajusta directamente con los *fittings* para el tubo por utilizar, proporciona una lectura precisa por su manera de tomar datos en contacto directo con el fluido y cuenta con salidas digitales que permiten aún más confiabilidad en los datos. Por último, el precio es de alrededor de \$18, lo cual lo hace accesible y de calidad.

Figura 22
Sensor de temperatura



Fuente: Amazon, s. f.a.

Reservorio de líquido

Como reservorio para el fluido del sistema se utilizan los tanques prefabricados de la marca Tatoko. Este viene con tres salidas para el tanque, con sus respectivos *fittings* para conectarlos de manera directa a la tubería del sistema. Dicho tanque tiene una capacidad de 200 ml para garantizar que el flujo del sistema permanezca estable. Para finalizar, el valor de este es de \$13.99. Por lo tanto, se justifica su compra en lugar de adquirir los materiales por separado.

Figura 23

Reservorio de fluido



Fuente: Amazon, s. f.h.

Relé de estado sólido

El relé de estado sólido seleccionado fue el FOTEK SSR-40 DD, que permite controlar cargas de corriente alterna mediante un circuito de corriente directa de bajo voltaje. Las ventajas de los relés de estado sólido sobre los normales son que su voltaje de activación es más bajo que el de los relés mecánicos y, principalmente, su alta velocidad de conmutación y su capacidad de trabajar por largos periodos sin desgastarse permite realizar el trabajo de PWM que se necesita

en este sistema. Este relé viene con un voltaje de control de 3-32 VDC y soporta una corriente de 40 A. Esta alta capacidad de corriente se debe a los módulos Peltier y su precio es de \$11.95.

Figura 24

Relé de estado sólido



Fuente: CRCibernética, s. f.

Fuentes de alimentación

Se seleccionaron dos fuentes de alimentación de VDC para el sistema, una que proporciona 48 V para los módulos Peltier que se encuentran conectados en serie y la otra 12 V para las bombas de alimentación y los ventiladores del disipador. Estas son de la marca Mean Well y los modelos son la LRS-350-48 y la LRS-150-12 y respectivamente. Los precios de estas son de \$28.69 para la de 48 V y \$17.95 para la de 12 V.

Figura 25
Fuente de 48 V



Fuente: Amazon, s. f.e.

Figura 26
Fuente de 12 V

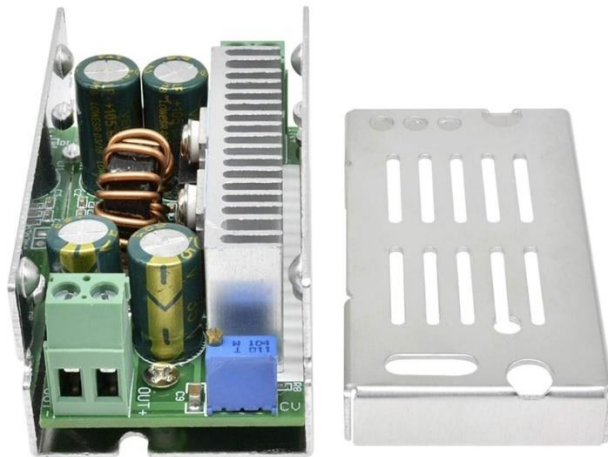


Fuente: Amazon, s. f.d.

Convertidor DC-DC

Este convertidor se seleccionó por sus altas capacidades de potencia. El modelo es el 200 W DC-DC Buck Converter Step-Down 60 V Adjustable Voltaje. Este puede recibir hasta 60 V de entrada y ajustar la salida desde 1.2 V hasta 36 V con una corriente máxima de 15 A. Su precio fue muy accesible, de \$19.95.

Figura 27
Convertidor DC-DC



Fuente: Micro JPM, s. f.d.

Presupuesto final

Al realizar la suma del precio de todos los componentes mencionados se consigue un presupuesto aproximado de lo que cuesta el proyecto. Este presupuesto permite a la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica tener una visión de lo que es el precio de un sistema didáctico. Con esto pueden añadir a su presupuesto más prototipos de sistemas que permiten enseñar de una manera más práctica en diversos laboratorios.

Tabla 9
Presupuesto final

Cantidad	Componente	Precio
3	Intercambiador de calor	\$19.49
4	Módulo Peltier	\$14.99
2	Bomba centrífuga	\$46.46
1	Pasta térmica	\$5.95
2	Sensor caudal	\$23.90
1	Sensor presión	\$15.99
1	Arduino Mega	\$68.95
1	Disipador	\$28.99
1	Termocupla	\$36.00
2	Reservorio de agua	\$27.98
1	Relé estado sólido	\$11.95
1	Fuente de 48 V	\$28.69
1	Fuente de 12 V	\$17.95
1	Convertidor DC-DC	\$19.95
1	Otros (mangueras, <i>fittings</i> y adaptadores)	\$60.00
	Monto total en dólares	\$427.24
	Monto total en colones (aproximado)	CRC 226.434,55

Para el presupuesto, no se toma en cuenta el monto de material e impresión 3D, ya que este fue proporcionado por él mismo Laboratorio Delta, que constaba de material antes del proyecto y para las actividades de este.

Capítulo VI

Integración del sistema

En esta etapa, se realiza la compra de cada componente que integrará el sistema final. Esta selección no solo se basa en la calidad del producto, sino también y, principalmente, en la capacidad de satisfacer las necesidades específicas del proyecto. Por otro lado, se realiza el montaje físico del sistema, cumpliendo con las mejores prácticas para garantizar que funcione de manera óptima.

Una vez que se tenga el sistema montado de manera física, se comienza la fase de pruebas para verificar que el sistema cumpla con los requisitos y requerimientos previos. Mediante las pruebas, se evalúa la capacidad del sistema para interactuar con los sensores por medio del Arduino y, en caso de alguna anomalía o defecto, se pueden realizar las correcciones necesarias para que cumpla con su funcionamiento e implementación final.

Adquisición de los elementos del sistema

Como primer paso para realizar la compra de los componentes, se identificaron los elementos esenciales para el proyecto. Este proceso se desarrolla en el apartado de modelado, en el cual se diseña desde cero el sistema y cada uno de sus elementos según las necesidades específicas.

Luego se procedió con la selección de las variantes específicas de cada componente. Esto se puede visualizar en el capítulo donde se realiza el presupuesto, en el que se lista cada componente y su respectivo proveedor.

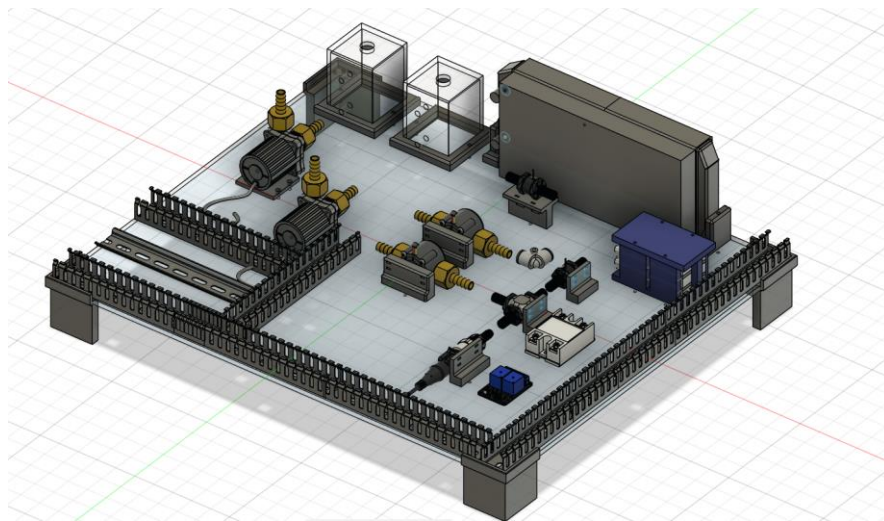
Por último, se realizó la compra, una vez que se tenía la lista de todos los componentes específicos necesarios. La mayoría se compró por medio de la plataforma Amazon y se tuvieron tiempos de espera de hasta 4 semanas para su recepción. Los otros elementos se compraron en empresas nacionales como MicropJPM o Anexos Industriales en el área de Cartago. Una vez que se tuvieron todos los componentes en mano, se verificó el cumplimiento de las especificaciones requeridas y se comprobó su funcionamiento correcto.

Estación del sistema didáctico

Con los componentes seleccionados, se diseña la estación en Fusion 360, con un enfoque en la accesibilidad y visibilidad de los dispositivos.

Figura 28

Vista general de prototipo en Fusion 360



Para desarrollar este prototipo, el primer paso fue la creación del soporte estructural, este permite garantizar la accesibilidad y correcta disposición de los elementos. Se optó por una base de acrílico de 6 mm de espesor con un tamaño de 50 mm x 60 mm. Este material se seleccionó debido a su durabilidad y facilidad para ser cortado mediante corte láser, para realizar los

agujeros de los componentes y soportes. Además, su transparencia da la posibilidad de una mejor visualización de los elementos.

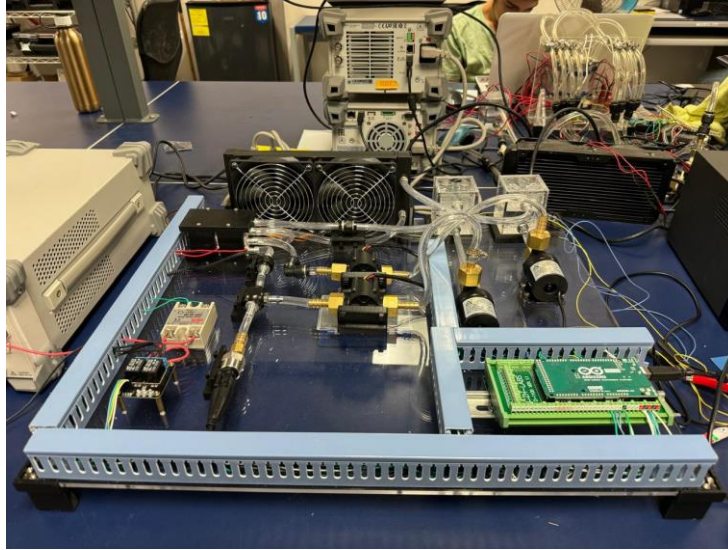
La base proporciona suficiente espacio para montar todos los componentes del sistema de manera organizada y eficiente. Cada elemento, desde los módulos Peltier hasta los sensores y el Arduino, tiene sus propios soportes diseñados para la estabilidad. Además, se tiene una canaleta alrededor de la mayoría del sistema para un cableado más organizado. Con los soportes individuales es posible realizar cambios de elementos sin dañar la integridad del sistema.

Además, las fuentes de alimentación se colocaron en la parte inferior de la base de acrílico, lo que se hizo para maximizar el espacio en ambas caras del soporte. Esta configuración mejora el cableado y también protege las fuentes para evitar interferencias mecánicas.

Configuración de componentes y cableado

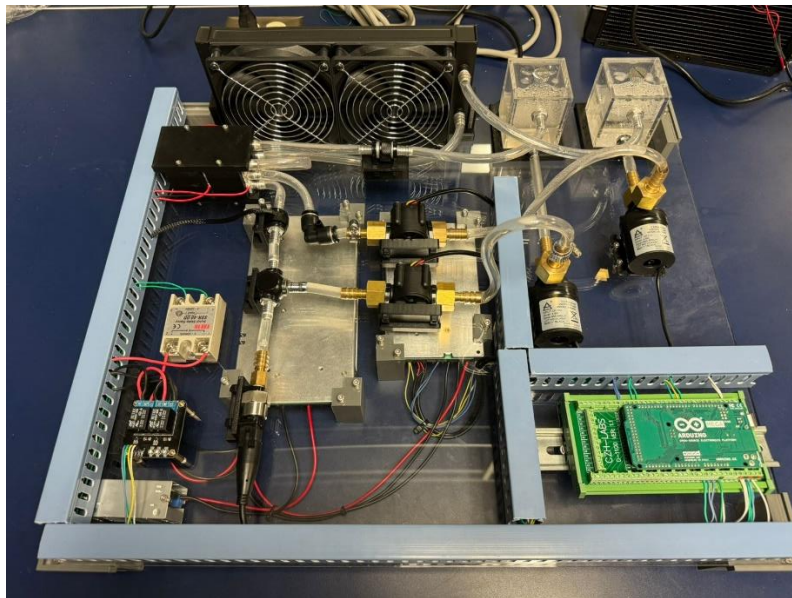
La distribución de los componentes se llevó a cabo según las conexiones por realizar. Los relés y los sensores se colocaron lo más cerca del Arduino o de uno de los ductos para llevar a cabo su conexión de manera ordenada. Además, se tomó en cuenta el posicionamiento de cada uno de los elementos con respecto a cómo irían distribuidas las tuberías. Estas se colocaron, de tal forma que se tuvieran buenos ángulos en el momento de doblar la tubería transparente. De esta forma, se realizó la construcción del sistema en físico.

Figura 29
Sistema en proceso de construcción



En la Figura 29 se muestra el sistema casi terminado sin las fuentes de alimentación. Estas fuentes fueron los últimos componentes en ser comprados, por lo que también se diferencia del sistema final por su menor altura entre la base de acrílico y la mesa. En la versión final se cambiaron los soportes por unos más altos para acoplar las fuentes.

Figura 30
Sistema funcional en físico



Luego de conectar todo el sistema, se realiza la programación del Arduino para tener un sistema que controla la temperatura según las mediciones de los sensores de temperatura y los módulos Peltier y también monitorea los sensores de flujo del líquido y de la presión. Con estos componentes de base, se programa un control PID para el relé de estado sólido que está conectado con dos relés mecánicos para controlar el calentamiento o enfriamiento del sistema. Este se puede revisar en el Anexo 1.

Pruebas y validación del sistema

Para verificar el funcionamiento de los sistemas de sensores y de los módulos Peltier se realizaron dos pruebas. Para llevarlas a cabo, se llenó el sistema de agua haciendo recircular el líquido mediante las bombas centrífugas.

La finalidad de las pruebas fue verificar el funcionamiento del sistema en condiciones normales de uso real. Las pruebas se realizaron para poder mostrar la eficacia de los módulos Peltier en un sistema de transferencia de calor; en estas se midió la temperatura, los flujos del sistema y la presión.

Prueba 1

Figura 31

Prueba de funcionamiento 1. Las mediciones fueron realizadas bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura inicial de 25 °C, voltaje aplicado de 30 V al módulo Peltier

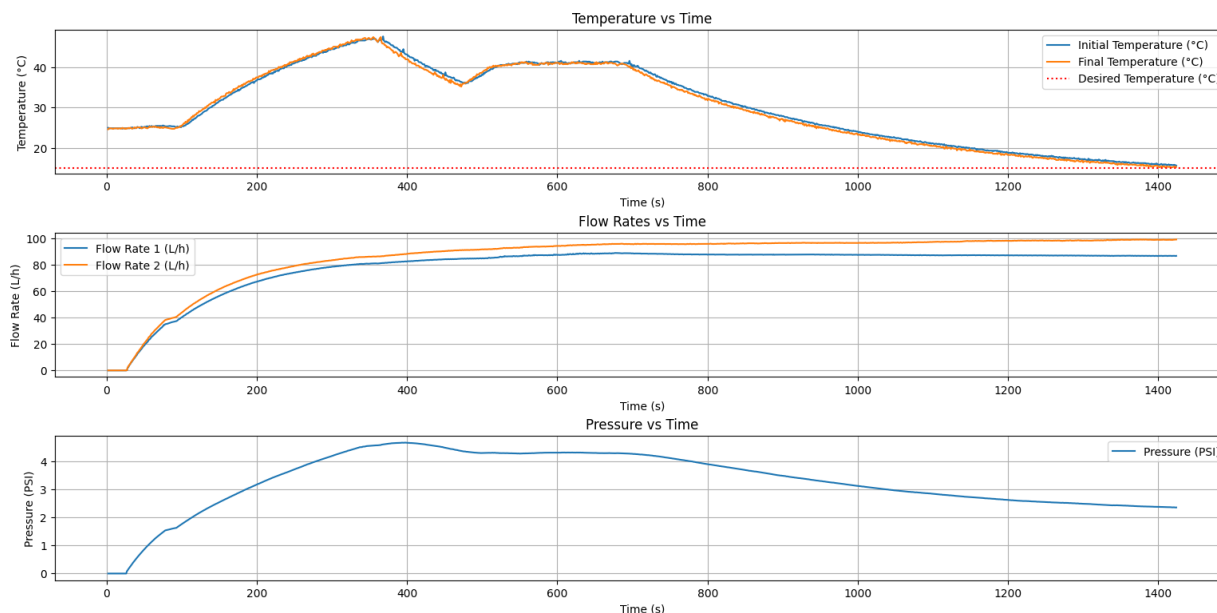
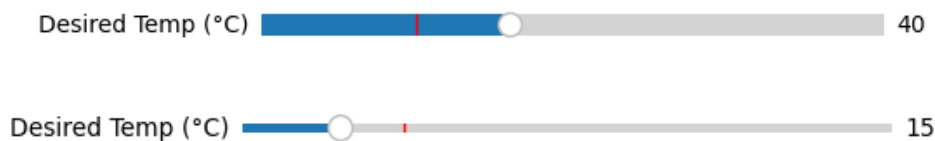


Figura 32

Regulador de temperatura deseada en Prueba 1



En la Figura 31 se puede observar el funcionamiento del sistema. Para esta prueba se realizan mediciones y control por más de 1400 segundos, con una temperatura inicial de aproximadamente 25 °C. Se selecciona una temperatura deseada de 40 °C, como se puede observar en la Figura 31. La temperatura dura pasando de aproximadamente 25 °C a 40 °C alrededor de 220 segundos. Luego de este cambio, se espera a que la temperatura se mantenga constante hasta que se elige otra temperatura deseada. Cerca de los 700 segundos de iniciada la prueba se hace el cambio de temperatura deseada a 15 °C. Por último, cerca de los 1400 segundos se consigue llegar a los 15 °C.

Para las mediciones del flujo del agua, se tienen dos sensores: uno en el sistema principal y el otro en el sistema de disipación. El flujo en el sistema principal, llamado *Flow Rate 1*, se muestra en la Figura 31 en color celeste y el flujo del sistema de disipación, llamado *Flow Rate 2*, se observa en color naranja. El *Flow Rate 1* se puede observar cómo aumenta hasta alrededor de 85 l/h (litros por hora) y el *Flow Rate 2* llega a aproximadamente 100 l/h.

Por último, la presión del sistema se mide en libras por pulgada cuadrada (PSI por sus iniciales en inglés), cuando ya se estabiliza a 40 °C, llega a un valor cercano a 4 psi. Luego de este punto como límite superior, comienza a disminuir en el momento en el que la temperatura también disminuye, llegando a un punto mínimo de aproximadamente 2.5 psi cuando la temperatura alcanza 15 °C. Esto comprueba la relación proporcional, según la Ley de Clausius-Clapeyron, entre la temperatura y la presión en un sistema líquido, donde la temperatura incrementa al igual que la presión y cuando disminuye la temperatura disminuye de esta forma la presión.

Prueba 2

Figura 33

Las mediciones fueron realizadas bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura inicial de 20 °C, voltaje aplicado de 30 V al módulo Peltier

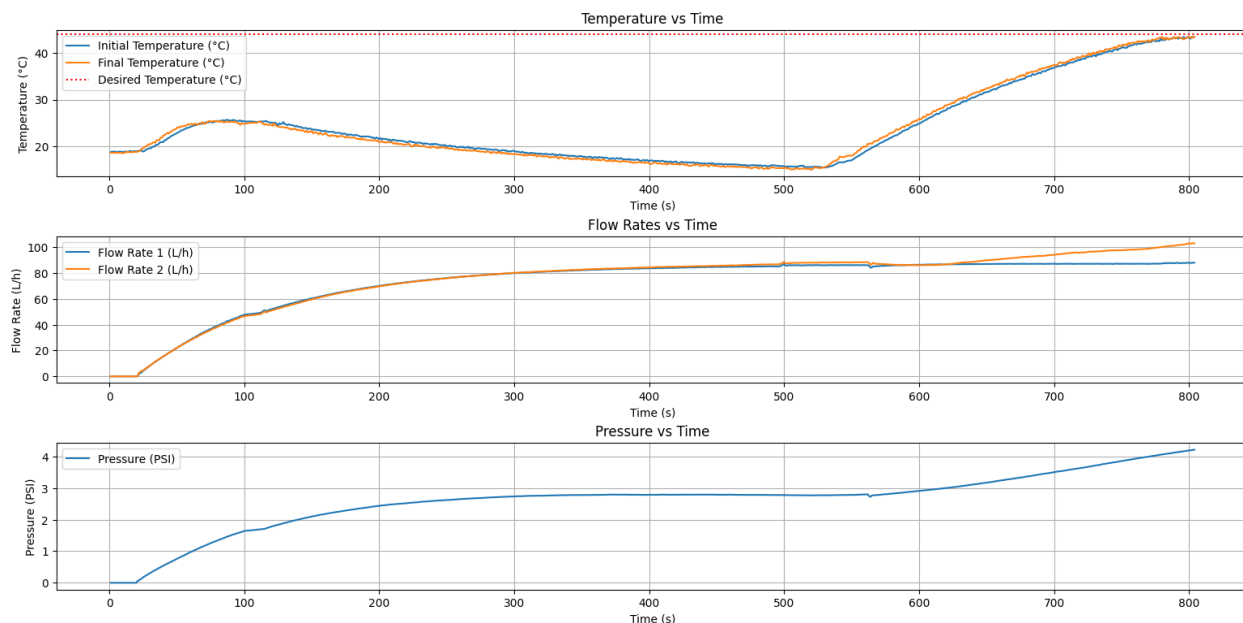
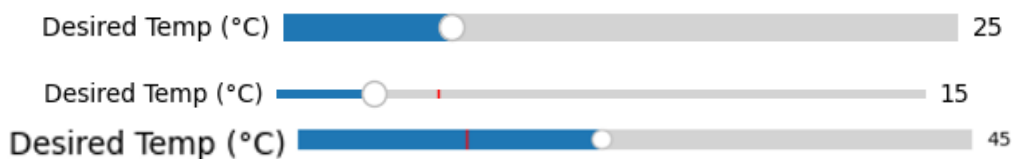


Figura 34

Regulador de temperatura deseada en Prueba 2



En la Figura 34 se puede observar el funcionamiento del sistema bajo otras condiciones de operación. Para esta prueba se realizan mediciones y control durante aproximadamente 800 segundos. Con una temperatura inicial de aproximadamente 20 °C, se comienza la prueba, se selecciona una temperatura deseada de 25 °C, como se puede observar en la Figura 34. Luego se cambia a 15 °C y se llega a este valor en un tiempo de 530 segundos de empezada la prueba. Luego de llegar a este punto mínimo, se selecciona un valor de temperatura deseada de 45 °C y se alcanza esta temperatura a los 800 segundos de la prueba. Esto demuestra que también los

módulos Peltier tienen la capacidad de realizar cambios de temperatura en un alto rango de funcionamiento.

En esta prueba, la medición de los flujos de los sistemas se toma bajo el mismo nombre que la anterior. Estos flujos, como se pueden observar en la Figura 31, esta vez se estabilizan casi toda la prueba en un valor para el *Flow Rate 1* y para el *Flow Rate 2* cercano a 80 l/h. De igual forma, muestran un cambio mínimo durante toda la prueba, lo que evidencia que, por las bombas centrífugas, el valor de flujo debe permanecer relativamente estable.

Finalmente, la presión del sistema, se estabiliza cerca de 3 psi, en el momento en que la temperatura comienza a subir, también la presión incrementa hasta alrededor de 4 psi. El cambio estable de la presión y ambas pruebas permiten deducir que el sistema es capaz de tomar mediciones y funcionar de manera correcta.

Capítulo VII

Conclusiones

A partir de los resultados y del desarrollo del proyecto, se plantean las conclusiones, que están divididas según cada objetivo específico.

Objetivo específico n.º 1

Se logró caracterizar el funcionamiento y la composición del sistema didáctico mediante la recolección de datos y necesidades de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se seleccionó cada elemento para realizar una prueba preliminar con los funcionamientos básicos requeridos. Además, se realizó una prueba preliminar que comprobó el funcionamiento de los módulos Peltier para un sistema de transferencia de calor.

Objetivo específico n.º 2

Se diseñó un sistema de transferencia de calor con sensores y relés, controlados mediante un Arduino. Por medio del *software* Matlab y una de sus partes llamada Simulink, se obtuvo un sistema modelado con los componentes y sus funciones mostrado en el Capítulo IV.

Asimismo, se realizó el diseño del sistema que cumplía con los requerimientos básicos que se plantearon de transferencia de calor. Además, se simuló el sistema en Simulink mediante la toma de cambios de temperaturas y tiempos en el sistema diseñado.

Objetivo específico n.º 3

Se elaboró un presupuesto para el sistema, seleccionando los componentes más compatibles con este. Además, se investigaron los precios de los componentes para seleccionar los más relevantes y con mejor relación de calidad al precio. Por último, se confeccionó un

presupuesto completo, listando cada componente requerido por el sistema completo, con un precio final de \$427.24 o de ₡226.435,55.

Objetivo específico n.º 4

Se integró el sistema de manera óptima con cada uno de sus componentes, logrando una planta didáctica completamente funcional. Se adquirió cada componente necesario para que el sistema funcionara de forma eficaz.

Asimismo, se realizó el ensamble y la conexión de cada componente en el sistema según se requería. Por último, se comprobó su funcionamiento mediante pruebas finales de cambios de temperatura, según los requerimientos.

Recomendaciones

Con respecto al sistema final, se tienen algunas recomendaciones físicas y de integración:

1. Se recomienda mantener un rango de temperaturas no mayor que 45 °C porque la tubería comienza a perder rigidez, y no menor que 15 °C, ya que la tubería empieza a condensarse.
2. Cuando se realizaron pruebas de temperaturas, se llegó a las limitaciones de 45 °C y de 15 °C. Para aumentar estos rangos, se debe realizar un cambio de las tuberías instaladas por unas con mayor rango de temperatura.
3. La interfaz del sistema necesita una computadora conectada para mostrar los datos. Esto se puede cambiar integrando una pantalla o monitor de alguna variante compatible con Arduino.

4. Los recipientes para el agua no permiten una inyección grande de líquido al sistema de manera inmediata. Por lo tanto, se recomienda un cambio a un reservorio más grande.
5. Para obtener un funcionamiento óptimo del sistema en el momento de iniciar una prueba, primero se debe alimentar el Arduino y lanzar el programa en una computadora y luego alimentar las fuentes externas. Algunas veces, no marcaba bien los parámetros de medición si se hacía de otra forma.
6. En el caso de las bombas centrífugas, no se debe mantener en uso continuo por más de 20 minutos, ya que después de eso se puede provocar un sobrecalentamiento.
7. Se debe realizar una implementación en cursos como el de control automático, en conjunto con la creación de una forma de uso, como un manual de laboratorio, para que las personas estudiantes lo utilicen.
8. Para su mejor funcionamiento se debe cambiar el líquido utilizado en el sistema cada mes.

Bibliografía

- Alaoui, C. (2011). Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation. *International Journal of Engineering*, 5(1), 114.
- Amazon. (s. f.a). *Mini brushless magnetic water pump w/ thread*.
<https://www.amazon.com/Mini-Brushless-Magnetic-Water-Thread/dp/B07DNSS1KB>
- Amazon. (s. f.b). *Alphacool 17363 Eiszapfen Temperature Sensor G1/4 IG/IG mit AG Adapter-deep Black Water Cooling Monitoring*. <https://www.amazon.com/dp/B01HQ8LJAI>
- Amazon. (s. f.c). *Aluminum water cooling block liquid cold water plate heat sink water-cooled exchanger head semiconductor refrigeration sheet CPU graphics radiator heatsink endothermic head (40 x 80 x 12mm)2pcs*. <https://www.amazon.com/Clyxgs-Water-Cooled-semiconductor-Refrigeration-Endothermic/dp/B08FTF374C>
- Amazon. (s. f.d). *40MMX40MM Heatsink Thermoelectric Cooling Peltier*.
<https://www.amazon.com/40MMX40MM-Heatsink-Thermoelectric-Cooling-Peltier/dp/B0BPY7Z3SW?th=1>
- Amazon. (s. f.e). *MEAN WELL LRS-150-12 150W 12V 12.5 Amp Enclosed Switchable Power Supply*. <https://www.amazon.com/MEAN-WELL-LRS-150-12-Enclosed-Switchable/dp/B00M8TBJLK>
- Amazon. (s. f.f). *MEAN WELL LRS-350-48 350.4W 48V 7.3A Switchable Power Supply*.
<https://www.amazon.com/MEAN-WELL-LRS-350-48-350-4W-Switchable/dp/B013EU4KNK>

Amazon. (s. f.g). *Pressure transducer sender sensor stainless.*

<https://www.amazon.com/Pressure-Transducer-Sender-Sensor-Stainless/dp/B074QPD5RT>

Amazon. (s. f.h). *200ml Acrylic Water Tank Cooler Water Cooling Radiator Pc CPU Water*

Block. <https://www.amazon.com/dp/B07TVPV3FZ>

Amazon. (s. f.i). *Water Cooling Computer Radiator, 12 Pipe Aluminum Heat Exchanger Liquid*

Cooling Radiator Heat Sink 240mm with Dual Fans for CPU PC Laser Water Cool System DC12V Black. <https://www.amazon.com/dp/B08DMRZQMH?th=1>

Borase, R. P.; Maghade, D. K.; Sondkar, S. Y. y Pawar, S. N. (2021). A review of PID control tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.

CRCibernética. (s. f.). *Solid state relay DC input DC output 40 A.*

<https://www.crcibernetica.com/solid-state-relay-dc-input-dc-output-40-a/>

De Iaco Veris, A. y De Iaco Veris, A. (2021). Control systems and valves. En *Fundamental*

Concepts of Liquid-Propellant Rocket Engines (pp. 447-562).

Drebushchak, V. A. (2008). The Peltier effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91,

311-315.

Giraldo, D. y Giraldo, E. (2019). *Teoría de Control Análogo.* Universidad Tecnológica de

Pereira.

- Hong, D. K.; Woo, B. C.; Koo, D. H. y Seo, U. J. (2011). A single-phase brushless DC motor with improved high efficiency for water cooling pump systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 4250-4253. doi:10.1109/TMAG.2011.2157482
- ISO. (2015). *ISO 15288:2015 Systems engineering - System life cycle processes*. International Organization for Standardization.
- Kondaveeti, H. K.; Kumaravelu, N. K.; Vanambathina, S. D.; Mathe, S. E. y Vappangi, S. (2021). A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. *Computer Science Review*, 40, 100364. doi:10.1016/j.cosrev.2021.100364
- Laboratorio Delta. (2020). <https://www.tec.ac.cr/unidades/laboratorio-delta>
- Matlab, S. (2012). *Matlab*. The MathWorks.
- Mellado, J. y Núñez, F. (2022). Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for Industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 25, 100250. doi:10.1016/j.jii.2021.100250
- Micro JPM. (s. f.a). *Arduino Mega 2560 R3*. <https://www.microjpm.com/products/arduino-mega-2560/>
- Micro JPM. (s. f.b). *Heat sink compound*. <https://www.microjpm.com/products/heat-sink-compound/>
- Micro JPM. (s. f.c). *MPX5500DP pressure sensor*. <https://www.microjpm.com/products/ad54311/>

Micro JPM. (s. f.d). *200W DC-DC Buck Converter Step-Down 60V Adjustable Voltage*.

<https://www.microjpm.com/products/ad76404>

Micro JPM. (s. f.e). *YF-S201 water flow sensor*. [https://www.microjpm.com/products/yf-s201-](https://www.microjpm.com/products/yf-s201-water-flow-sensor)

[water-flow-sensor](https://www.microjpm.com/products/yf-s201-water-flow-sensor)

Mohamed Nazim, N. A.; Seah, S. Y.; Jumat, M. Z.; Low, Y. B.; Thio, B. J. R. y Wong, S. Y.

(2023). Design and implementation of a portable heat exchanger kit in an undergraduate engineering heat and mass transfer course. *Education for Chemical Engineers*, 45, 130-140. doi:10.1016/j.ece.2023.09.002

Rupitsch, S. J. (2019). Simulation of piezoelectric sensor and actuator devices. En *Piezoelectric*

Sensors and Actuators. Topics in Mining, Metallurgy, and Materials Engineering.

Simscape. (s. f.). Simscape. *Matlab*. <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>

Siraskar, R. (2021). Reinforcement learning for control of valves. *Machine Learning with*

Applications, 4, 100030. doi:10.1016/j.mlwa.2021.100030

Anexos

Anexo 1. Programación del Arduino y de Python

En un repositorio de GitHub, la programación del sistema, así como la del Arduino y de los gráficos en Python, se puede encontrar en el siguiente *link*:

<https://github.com/lcamacho112/TFG.git>