



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PROCESOS INDUSTRIALES”**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECÁNICO**

**AUTORES:**

**Ginson Damian Iza Jiménez**

**Boris Javier Toapanta Llumipanta**

**TUTOR:**

**Ing. Byron Paul Corrales Bastidas**

**LATACUNGA, AGOSTO 2024**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros Ginson Damian Iza Jiménez con CI: 2200071278 y Boris Javier Toapanta Llumipanta con CI: 1725718572; declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PROCESOS INDUSTRIALES”**, siendo el Ing. Byron Paul Corrales Bastidas, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 19 de Agosto del 2024

Ginson Damian Iza Jiménez  
CI: 2200071278

Boris Javier Toapanta Llumipanta  
CI: 1725718572

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PROCESOS INDUSTRIALES”**, de Iza Jiménez Ginson Damian y Toapanta Llumipanta Boris Javier, de la carrera de Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 19 de Agosto del 2024



Ing. Corrales Bastidas Byron Paul  
CI: 0502347768  
**TUTOR**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Ginson Damian Iza Jiménez y Boris Javier Toapanta Llumipanta con el título de Proyecto de titulación: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PROCESOS INDUSTRIALES”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 19 de Agosto del 2024

Para constancia firman:



Lector 1

Dr. Enrique Torres Tamayo  
CI: 1757121940



Lector 2

Dr. Héctor Luis Laurencio Alfonso  
CI: 1758367252



Lector 3

Ing. Luis Miguel Navarrete López  
CI: 1803747284

## **AGRADECIMIENTO**

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios por darme la salud, guiarme y darme el intelecto para realizar este logro.*

*Agradezco a mis padres, así como a mi hermano, por estar siempre apoyándome incondicionalmente, por lo consejos dados para lograr esta meta, el esfuerzo brindado siendo el sustento esencial en toda mi formación universitaria.*

*También quiero agradecer a mis amigos los cuales forme una amistad en este proceso académico, que siempre supieron ayudarme en momentos cruciales de mi vida tanto dentro como fuera de la Universidad.*

**Ginson**

## **AGRADECIMIENTO**

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios por darme la salud, guiarme y darme el intelecto para realizar este logro.*

*Agradezco a mis padres, así como a mis hermanas, por estar siempre apoyándome incondicionalmente, por lo consejos dados para lograr esta meta, el esfuerzo brindado siendo el sustento esencial en toda mi formación universitaria.*

*También quiero agradecer a mis amigos los cuales forme una amistad en este proceso académico, que siempre supieron ayudarme en momentos cruciales de mi vida tanto dentro como fuera de la Universidad.*

**Boris**

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo va dedicado a mis padres y hermano, que fueron los que siempre me apoyaron y confirmaron en mí y en las metas que me he propuesto.*

*A todas las personas especiales que conocí en este proceso académico, que me acompañaron dentro y fuera de la Universidad como personas y como amigos.*

**Ginson**

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo va dedicado a mis padres, hermanas, que fueron los que siempre me apoyaron y confirmaron en mí y en las metas que me he propuesto.*

*A todas las personas especiales que conocí en este proceso académico, que me acompañaron dentro y fuera de la Universidad como personas y como amigos.*

**Boris**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**TITULO: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL  
PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PROCESOS INDUSTRIALES”**

**Autores:**

**IZA JIMENEZ GINSON DAMIAN**  
**TOAPANTA LLUMIPANTA BORIS JAVIER**

**RESUMEN**

La necesidad del presente trabajo está dada en las imprecisiones de las mediciones de los parámetros térmicos que permiten un cálculo adecuado del coeficiente experimental de transferencia de calor por convección. Se implementó un sistema que integró tecnologías modernas, como PLC, HMI y sensores, para regular los parámetros térmicos de manera precisa. El desarrollo del proyecto comenzó con una investigación sobre la teoría fundamental de la transferencia de calor y las técnicas de automatización. Esta investigación fundamentó la selección de sensores y actuadores adecuados para el sistema, así como la programación del control necesario para integrar todos los componentes de manera coherente y eficiente. Se prestó especial atención a la calibración y ajuste de los sensores para asegurar la precisión de las mediciones y el correcto funcionamiento de los actuadores en el entorno experimental. Durante la fase de implementación, se llevaron a cabo diversas pruebas de funcionamiento que confirmaron la efectividad del sistema en condiciones operativas reales. El análisis del error del coeficiente experimental en comparación con el coeficiente teórico de Zukauskas mostró una discrepancia de aproximadamente un 2%, lo que indica un nivel aceptable de precisión en el sistema desarrollado y proporciona una base sólida para futuras mejoras y aplicaciones.

Palabras clave: Automatización, PLC, HMI, Convección, Transferencia de calor

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY**

**THEME: "DEVELOPMENT OF A MONITORING AND CONTROL SYSTEM  
FOR HEAT TRANSFER IN INDUSTRIAL PROCESSES"**

**Authors:**

**IZA JIMENEZ GINSON DAMIAN**  
**TOAPANTA LLUMIPANTA BORIS JAVIER**

**ABSTRACT**

The necessity of this work arises from the inaccuracies measuring in thermal parameters that allow for an adequate calculation of experimental heat transfer coefficient by convection. A system was implemented that integrates modern technologies such as PLC, HMI, and sensors to precisely regulate thermal parameters. The development of the project began with research on fundamental theory of heat transfer and automation techniques. This research informed the selection of appropriate sensors and actuators for the system, as well as, the programming required to integrate all components coherently and efficiently. Special attention was given to calibration and adjustment of sensors to ensure accurate measurements and proper functioning of actuators in the experimental environment. During the implementation phase, various operational tests were conducted that confirmed systems effectiveness under real conditions. The error analysis of experimental coefficient compared to the theoretical coefficient by Zukauskas showed a discrepancy of approximately 2%, indicating an acceptable precision level in the system developed and providing a solid foundation for future improvements and applications.

Keywords: Automation, PLC, HMI, Convection, Heat transfer.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA .....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. SITUACION PROBLEMÁTICA.....	2
2.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	4
2.3.1. Objeto de Investigación: Módulo de transferencia de calor .....	4
2.3.2. Campo de Acción: Automatización y control.....	4
2.4. BENEFICIARIOS .....	4
2.4.1. Beneficiarios Indirectos.....	4
2.4.2. Beneficiario Directo .....	4
2.5. JUSTIFICACION .....	4
2.6. OBJETIVOS .....	5
2.6.1. Objetivo General.....	5
2.6.2. Objetivos Específicos .....	5
2.7. SISTEMAS DE TAREAS.....	5
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	7
3.1. TRANSFERENCIA DE CALOR .....	7
3.1.1. Tipos de Transferencia de Calor .....	8
3.2. SISTEMAS DE CONTROL .....	9

3.2.1.	TIPOS DE CONTROL.....	10
3.3.	TIPOS DE PLCs .....	11
3.3.1.	PLCs Compactos .....	11
3.3.2.	PLCs Modulares .....	12
3.3.3.	PLCs de Montaje en Rack .....	12
3.4.	CONTROL DE FASE.....	12
3.4.1.	Control de Ángulo de Conducción.....	13
3.4.2.	Control de Onda Completa.....	13
3.4.3.	Control de Cero Cruzamiento.....	14
3.4.4.	Control Proporcional de Fase .....	14
3.4.5.	Control de Ciclo de Trabajo .....	15
3.5.	TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA.....	15
3.5.1.	Termistores .....	15
3.5.2.	Termopares .....	16
3.5.3.	Termopilas .....	16
3.5.4.	Sensores de Infrarrojos .....	17
3.5.5.	Sensores termocupla .....	17
4.	METODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	18
4.1.	DECLARACIÓN DE VARIABLES.....	18
4.2.	METODOLOGÍA DE DISEÑO .....	18
4.3.	DEFINICIÓN DEL OBJETIVO DEL SISTEMA .....	19
4.4.	ANÁLISIS DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA .....	19
4.5.	SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES.....	20
4.5.1.	PLC Logo! .....	20
4.5.2.	Módulo de expansión de salidas analógicas .....	20
4.5.3.	HMI KTP600.....	21

4.5.4.	Circuito fase.....	21
4.5.5.	Termocupla tipo k.....	22
4.5.6.	Transmisor .....	23
4.5.7.	Resistencia tipo Cartucho .....	23
4.6.	BLOQUES DE PROGRAMACION .....	24
4.6.1.	Entradas .....	24
4.6.2.	Marcas .....	24
4.6.3.	Salidas.....	24
4.6.4.	Función NOT .....	25
4.6.5.	Función AND.....	25
4.6.6.	Función OR .....	25
4.6.7.	Multiplexor analógico .....	26
4.6.8.	Instrucción aritmética .....	26
4.6.9.	Niveles fijos.....	26
4.6.10.	Filtro Analógico .....	27
4.6.11.	Amplificador analógico .....	27
4.6.12.	Regulador PI .....	27
4.7.	DESARROLLO DEL SISTEMA .....	28
4.7.1.	Estructura del sistema.....	28
4.7.2.	Circuito eléctrico del sistema .....	28
4.8.	DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL .....	29
4.9.	MÉTODO DE SINTONIZACION ZIEGLER NICHOLS .....	30
4.10.	CÁLCULOS DE TRANFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN ..	31
4.11.	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	34
4.11.1.	Anemómetro .....	34
4.11.2.	Termómetro Infrarrojo .....	34

5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	35
5.1.	TABLERO DE CONTROL .....	35
5.1.1.	Conexiones del tablero de control .....	36
5.2.	CIRCUITO DE FASE .....	36
5.2.1.	Prueba del Circuito de Fase .....	37
5.3.	CALIBRACIÓN DE TERMOCUPLAS.....	38
5.3.1.	Parámetros del Amplificador Analógico.....	38
5.3.2.	Pruebas de termocuplas .....	39
5.4.	CALIBRACIÓN DEL CONTROL PI .....	40
5.4.1.	Regla de Sintonía Ziegler Nichols.....	40
5.4.2.	Prueba de funcionamiento .....	42
5.4.3.	Pruebas de tiempo de control PI.....	43
5.5.	PROGRAMACIÓN .....	43
5.5.1.	Desarrollo de la Programación .....	43
5.5.2.	Interfaz para la Interacción de la pantalla HMI.....	47
5.5.3.	Conexión del Logo al HMI.....	50
5.6.	VELOCIDAD DE BLOWER.....	50
5.7.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	51
5.8.	DEMOSTRACION PRACTICA .....	53
5.9.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	54
5.9.1.	Costos Directos.....	54
5.9.2.	Costos indirectos .....	54
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	55
6.1.	CONCLUSIONES .....	55
6.2.	RECOMENDACIONES.....	56
7.	REFERENCIAS .....	56

8. ANEXOS..... 59

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Tabla de actividades.....	6
Tabla 4. 1 Características del PLC Logo![9] .....	20
Tabla 4. 2 Característica Módulo de expansión de salidas analógicas[9] .....	21
Tabla 4. 3. Características HMI KTP600[9].....	21
Tabla 4. 4 Características del Circuito fase .....	22
Tabla 4. 5. Características de la termocupla tipo k.....	22
Tabla 4. 6 Características del Transmisor .....	23
Tabla 4. 1. Ecuación Ziegler Nichols[16].....	30
Tabla 4. 2. Propiedades Termofísicas[3].....	32
Tabla 4. 3 Constantes de ecuación (4.5)[3] .....	33
Tabla 4. 4 Constantes de la ecuación (4.7)[3].....	33
Tabla 4. 5 Tabla de Características del Anemómetro[17].....	34
Tabla 4. 6 Características Termómetro Infrarrojo[18].....	35
Tabla 5. 1. Tiempo de estabilización .....	43
Tabla 5. 2. Costos Directos.....	54

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. PLCs Compactos[9] .....	11
Figura 3. 2 PLCs Modulares.[8].....	12
Figura 3. 3. PLCs de Montaje en rack[8] .....	12
Figura 3. 4. Angulo de Conducción.[10] .....	13
Figura 3. 5. Control de Media onda[11] .....	13
Figura 3. 6 Control de Ciclo completo[11].....	14
Figura 3. 7. Control de Cero Cruzamiento[10].....	14
Figura 3. 8. Control Proporcional de Fase[11] .....	15
Figura 3. 9. Control Ciclo de Trabajo[11] .....	15
Figura 3. 10. Termistores[12] .....	16
Figura 3. 11. Termopares[13] .....	16
Figura 3. 12. Termopilas[13] .....	16
Figura 3. 13. Sensores de Infrarrojo[14].....	17
Figura 3. 14. Termocuplas[14].....	17
Figura 4. 1. Fases de Diseño.....	18
Figura 4. 2 Bloque de Entradas digital y analógica[15] .....	24
Figura 4. 3. Bloques de marca digital y analógica.[15].....	24
Figura 4. 4. Bloque de salida digital.[15] .....	24
Figura 4. 5. Bloque de salida Analógica.[15] .....	25
Figura 4. 6. Función NOT[15].....	25
Figura 4. 7. Función AND[15] .....	25
Figura 4. 8. Función OR[15] .....	26
Figura 4. 9. Multiplexor analógico[15] .....	26

Figura 4. 10. Instrucción aritmética[15] .....	26
Figura 4. 11. Estado 1[15] .....	26
Figura 4. 12. Estado 0[15] .....	27
Figura 4. 13. Filtro analógico[15].....	27
Figura 4. 14. Amplificador analógico[15] .....	27
Figura 4. 15. Regulador PI[15] .....	27
Figura 4. 16. Estructura del sistema de monitoreo y control. ....	28
Figura 4. 17. Esquema del circuito del sistema de monitoreo y control.....	29
Figura 4. 18. Diseño del tablero .....	30
Figura 4. 19. Anemómetro[17] .....	34
Figura 4. 20. Termómetro Infrarrojo[18] .....	35
Figura 5. 1. Modelo final del Tablero de Control .....	36
Figura 5. 2. Tablero de control parte posterior .....	36
Figura 5. 3. Circuito de Fase .....	37
Figura 5. 4 Onda Controlada .....	37
Figura 5. 5. Ecuación de la recta en GeoGebra .....	39
Figura 5. 6. Parámetros en el Amplificador Analógico .....	39
Figura 5. 7. Pruebas de Temperatura .....	40
Figura 5. 8 System Identification del software MATLAB. ....	40
Figura 5. 9 Valores Para el Calculo de Ziegler Nichols.....	41
Figura 5. 10 Comportamiento de control .....	41
Figura 5. 11 Designación de Datos del controlador PI.....	42
Figura 5. 12. sintonización de Ziegler Nichols.....	42
Figura 5. 13. Software .....	43
Figura 5. 14. Paro de Emergencia.....	44

Figura 5. 15.Programación de la resistencia de cartucho .....	44
Figura 5. 16.Programación para el blower .....	44
Figura 5. 17.Programación para la resistencia de cartucho. ....	45
Figura 5. 18.Sección control PI .....	45
Figura 5. 19. Temperatura infinita2 termocupla. ....	45
Figura 5. 20.Temperatura de superficie .....	46
Figura 5. 21.Cálculo del coeficiente de convección.....	46
Figura 5. 22.Programación Temperatura Ambiente.....	47
Figura 5. 23.Creación del proyecto HMI.....	47
Figura 5. 24.Selección de la pantalla HMI. ....	48
Figura 5. 25.Bonotes de la pantalla HMI.....	48
Figura 5. 26.Pantalla HMI .....	49
Figura 5. 27.Pantalla inicial del HMI .....	49
Figura 5. 28.Declaración de variables en el HMI.....	50
Figura 5. 29. Prueba de Temperatura.....	51
Figura 5. 30 Datos con la temperaturade 180°c .....	51
Figura 5. 31.Demostración Practica .....	53

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** Desarrollo de un sistema de monitoreo y control para la transferencia de calor en procesos industriales

**Modalidad de Titulación:**

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:**

Iza Jiménez Ginson Damian

Toapanta Llumipanta Boris Javier

ING. Corrales Bastidas Byron Paul

**Área de Conocimiento**

**Área:** Ingeniería, Industria y Construcción.

**Subárea del conocimiento:** Ingeniería y Profesiones Afines.

**Subárea Especifica conocimiento:** Electrónica y automatización.

**Línea de Investigación:** Procesos Industriales

**Sub líneas de investigación:** Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos

## **2. INTRODUCCIÓN**

La transferencia de calor es un proceso esencial en el estudio de la ingeniería térmica y otras disciplinas científicas relacionadas. En el ámbito educativo, los módulos didácticos que simulan estos procesos desempeñan un papel crucial en la enseñanza de los conceptos fundamentales y sus aplicaciones prácticas de la transferencia de calor. Sin embargo, para que estos módulos cumplan su propósito educativo de manera efectiva, es esencial que proporcionen datos confiables. El módulo didáctico de transferencia de calor bajo estudio enfrenta un problema significativo la inexactitud en las lecturas de datos como resultado de la ausencia de un sistema de monitoreo y control adecuado. Este problema compromete la precisión en la determinación del coeficiente de transferencia de calor, una métrica clave para evaluar la eficiencia del intercambio térmico entre materiales y sistemas. La precisión de estos cálculos es crucial tanto para la comprensión teórica como para la aplicación práctica de los conceptos de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor, que mide la cantidad de calor transferido a través de una superficie o un material en función de las condiciones del entorno, es una variable crítica en la ingeniería térmica. Su determinación exacta permite el diseño y análisis efectivos de sistemas térmicos, como intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración y procesos industriales. En un entorno académico, la capacidad para realizar experimentos precisos y obtener resultados confiables es esencial para que los estudiantes puedan relacionar la teoría con la práctica y desarrollar habilidades aplicables en escenarios reales.

La ausencia de un sistema de monitoreo y control en el módulo didáctico no solo dificulta la obtención de datos precisos, sino que también afecta la capacidad de los estudiantes para realizar experimentos. Esto puede llevar a una formación incompleta y a una comprensión superficial de los principios de transferencia de calor. En consecuencia, se torna imperativo abordar esta deficiencia mediante la implementación de soluciones tecnológicas que garanticen la exactitud de las mediciones y, en consecuencia, mejoren la calidad del proceso educativo.

### **2.1. SITUACION PROBLEMÁTICA**

En la carrera de Ingeniería Electromecánica, los alumnos que cursan Termodinámica abordan ejercicios sobre transferencia de calor por convección desde una perspectiva

teórica y práctica, pero presentan algunas dificultades en la parte de la práctica ya que el sistema de monitoreo cuenta con elementos básicos y estos elementos no se encuentran fijados de manera correcta

En los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi existe un módulo que permite realizar una sola práctica que se encuentra deshabilitado porque sus elementos no cuentan con una conexión estable. Por este motivo se ha visto necesario desarrollar el sistema de monitoreo y control del módulo de transferencia de calor por convección.

La falta de un sistema de monitoreo y control adecuado limita la capacidad de los estudiantes para realizar prácticas con diferentes parámetros y desarrollar habilidades prácticas relevantes en este campo crucial. Esto puede tener un impacto negativo en su preparación para enfrentar desafíos prácticos en una variedad de industrias donde la transferencia de calor desempeña un papel fundamental. En la Universidad Técnica de Cotopaxi, la ausencia de un módulo automatizado para la transferencia de calor representa un desafío significativo en la formación de los estudiantes de la facultad CIYA, especialmente en el contexto de la asignatura de Termodinámica. La inhabilitación del módulo actual debido a problemas de conexión no solo restringe la capacidad de los estudiantes para implementar prácticas efectivas en transferencia de calor por convección, sino que también limita la exploración y comprensión profunda de los conceptos teóricos a través de la aplicación práctica. Esta situación no solo afecta la calidad del aprendizaje, sino que también podría disminuir la motivación y el interés de los estudiantes en el tema.

Además, desde una perspectiva de investigación, la carencia de un sistema eficiente de monitoreo y control restringe las oportunidades para llevar a cabo investigaciones relevantes en el campo de la transferencia de calor. Esto limita el potencial de la universidad para contribuir al avance del conocimiento en esta área. Mejorar el sistema de monitoreo y control del módulo de transferencia de calor no solo beneficiaría el aprendizaje de los estudiantes, sino que también promovería la realización de investigaciones en la facultad CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## **2.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

El módulo de transferencia de calor presenta lecturas inexactas debido a la falta de un sistema de monitoreo y control, comprometiendo la precisión del cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.

## **2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

**2.3.1. Objeto de Investigación:** Módulo de transferencia de calor

**2.3.2. Campo de Acción:** Automatización y control

## **2.4. BENEFICIARIOS**

### **2.4.1. Beneficiarios Indirectos**

- Estudiantes, Profesores e Investigadores

### **2.4.2. Beneficiario Directo**

- Comunidad Académica y Científica Nacional

## **2.5. JUSTIFICACION**

El módulo de transferencia de calor presenta un desafío significativo debido a las lecturas inexactas que surgen de la ausencia de un sistema de monitoreo y control adecuado. Este problema afecta directamente la precisión del cálculo del coeficiente de transferencia de calor, que es fundamental para entender y aplicar los principios de la transferencia de calor en contextos prácticos y académicos. La transferencia de calor es un concepto clave en ingeniería y ciencias aplicadas, y su correcta interpretación y aplicación dependen de datos fiables. En un entorno educativo, donde el objetivo es proporcionar una comprensión clara y precisa de estos conceptos, las inexactitudes en las lecturas pueden llevar a malentendidos y a una formación deficiente de los estudiantes.

La falta de un sistema de monitoreo y control impide la obtención de datos consistentes, lo cual es esencial para realizar cálculos del coeficiente de transferencia de calor. Este coeficiente es una medida crítica que determina la eficiencia con la que el calor se transfiere a través de materiales y sistemas, y su correcta determinación es crucial para el diseño y análisis de procesos térmicos en ingeniería. En un módulo didáctico, la capacidad de realizar experimentos y obtener resultados es vital para la enseñanza efectiva de los principios de la transferencia de calor.

## **2.6. OBJETIVOS**

### **2.6.1. Objetivo General**

Desarrollar un sistema de monitoreo y control de variables térmicas para el cálculo del coeficiente de la transferencia de calor por convección.

### **2.6.2. Objetivos Específicos**

- Investigar la teoría relacionada a la automatización de un proceso de transferencia de calor por convección
- Desarrollar el sistema de monitoreo y control eficiente para regular los parámetros térmico aplicada a un proceso de transferencia de calor por convección
- Validar el funcionamiento del sistema de control en el proceso de transferencia de calor por convección.

## **2.7. SISTEMAS DE TAREAS**

Como se muestra en la Tabla 2.1 se presenta una programación de actividades organizadas según los objetivos específicos establecidos para este proyecto

Tabla 2.1 Tabla de actividades

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar la teoría relacionada a la automatización de un proceso de transferencia de calor por convección	1) Investigación sobre transferencia de calor por convección 2) Identificación de métodos y técnicas de automatización	Documentación detallada de métodos y técnicas de automatización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación bibliográfica.</li> <li>• Investigación dispositivos de automatización.</li> </ul>
Desarrollar el sistema de monitoreo y control eficiente para regular los parámetros térmico aplicada a un proceso de transferencia de calor por convección	1)Diseño del sistema de monitoreo y control 2)Selección de sensores y actuadores adecuados 3) Desarrollo del software de control 4) Integración de componentes y pruebas	Monitorear los parámetros térmicos relevantes durante el proceso de transferencia de calor por convección.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software de simulación.</li> <li>• Dispositivos de control</li> <li>• Equipos de medición.</li> </ul>
Validar el funcionamiento del sistema de control en el proceso de transferencia de calor por convección.	1) Desarrollo de Pruebas de funcionamiento del sistema	Validación del Sistema en Condiciones Operativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de práctica</li> </ul>

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

Diversos investigadores, como Cengel Y. y Boles M., así como Holman J.[1], [2] , han explorado en detalle los procesos termodinámicos y, en particular, la transferencia de calor. Ellos afirman que el proceso de transferencia de calor es un fenómeno natural que ocurre en el medio ambiente, donde algunos procesos son percibidos por los seres humanos mientras que otros transcurren sin ser notados. Este fenómeno ha existido desde el origen de la Tierra. Por otro lado, Incropera F. y De Witt D. [3], aunque coinciden en las bases teóricas con los autores mencionados, señalan que dentro de los métodos de transferencia de calor existen diferentes enfoques, tales como la conducción axial, lineal o radial.

En la Universidad Politécnica Nacional, los autores Velásquez J. y Tituana R [4]. reportan que el equipo desarrollado en su proyecto de titulación mostró un desempeño adecuado en la transferencia de calor a través de materiales no metálicos. Este trabajo permitió consolidar los conocimientos teóricos impartidos en clase y proporcionar una comprensión más profunda del comportamiento observado en los experimentos realizados. Los resultados obtenidos por estos autores presentan diferencias notables respecto a los mencionados por otros estudios.

Choéz W.[5], en su investigación previa a obtener el título de ingeniero mecánico, demostró la aplicación de las leyes que rigen la transferencia de calor. Enfatizó la importancia de comprender estos procesos y de utilizar los modelos adecuados para su correcta aplicación en la ingeniería. Además, destacó que la automatización y el uso de computadoras permiten una mayor eficacia y una adquisición de datos más precisa en el estudio de estos procesos.

#### **3.1.TRANSFERENCIA DE CALOR**

De acuerdo con la perspectiva de Frank Incropera en su obra "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", se centra en el estudio de cómo se mueve la energía térmica entre diferentes sistemas y ambientes. Este campo aborda tres modos principales de transferencia: La transferencia de calor se manifiesta de tres maneras: conducción, convección y radiación. La conducción ocurre cuando el calor se transfiere a través de materiales sólidos o líquidos que permanecen en reposo, y sigue la ley de Fourier. La

convección, por su parte, se refiere al intercambio de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, ya sea por mecanismos naturales o forzados. En contraste, la radiación implica la transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material. Estos conceptos son fundamentales en ingeniería para el diseño de sistemas eficientes de intercambio térmico, climatización y diversas aplicaciones industriales[3].

### **3.1.1. Tipos de Transferencia de Calor**

- Conducción Térmica

La conducción de calor se refiere al proceso por el cual el calor se transfiere a través de un medio en reposo, como sólidos y líquidos que no se mueven. Este fenómeno se describe mediante la ley de Fourier, que relaciona la cantidad de calor transferido con el gradiente de temperatura y la conductividad térmica del material. La conductividad térmica es una característica del material que indica cuán eficazmente conduce el calor y puede variar según la temperatura y la composición del material. En la práctica, estos conceptos son aplicados para resolver problemas relacionados con la transferencia de calor en contextos como el análisis de materiales compuestos, problemas transitorios y el diseño de aletas y estructuras compuestas [3].

- Convección Térmica

La convección térmica se refiere a la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, como el aire o el agua. Este proceso se evalúa mediante el coeficiente de transferencia de calor convectivo, que mide la eficacia de la transferencia térmica entre la superficie y el fluido circundante. Existen dos tipos de convección: la natural, que ocurre debido a gradientes de densidad causados por diferencias de temperatura, y la forzada, que se produce mediante dispositivos externos como ventiladores o bombas. Además, el tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento, afecta los coeficientes de transferencia de calor convectiva y es fundamental en diversas aplicaciones ingenieriles, incluyendo el diseño de sistemas de refrigeración, intercambiadores de calor y sistemas de climatización [3].

- Radiación Térmica

La radiación térmica se produce a través de ondas electromagnéticas y no requiere un medio material para propagarse, lo que la distingue de los procesos de conducción y convección. La ley de Stefan-Boltzmann describe cómo la tasa de emisión de radiación depende de la temperatura de un cuerpo negro, mientras que la emisividad de un material determina su capacidad para emitir radiación en comparación con un cuerpo negro ideal. Este fenómeno es fundamental en aplicaciones donde la radiación juega un papel crucial, como en el diseño de paneles solares, sistemas de calefacción por infrarrojos y aplicaciones espaciales donde las condiciones de vacío son comunes [3].

- Aplicaciones Prácticas

Además de los aspectos teóricos, estos principios son esenciales para el diseño y la optimización de sistemas de ingeniería, incluidos intercambiadores de calor, aislamientos térmicos avanzados y sistemas de climatización eficientes. Comprender estos mecanismos de transferencia de calor permite a los ingenieros mejorar el rendimiento térmico de los sistemas y optimizar su diseño para diferentes aplicaciones industriales y ambientales [3].

### **3.2.SISTEMAS DE CONTROL**

- Lazo Abierto

En el contexto de sistemas de control, el lazo abierto se refiere a una configuración donde la salida del sistema no influye directamente en la entrada o en las acciones de control. En este sistema: El controlador genera una señal de control basada únicamente en la referencia establecida por el usuario o el operador. NO hay un mecanismo de retroalimentación que compense o corrija las variaciones o errores entre la salida deseada y la salida real del sistema, es más simple y menos costoso de implementar, pero también es menos robusto frente a perturbaciones y variaciones en el sistema [6].

- Lazo Cerrado:

En contraste, el lazo cerrado implica una configuración donde la salida del sistema se mide y se utiliza para retroalimentar el controlador, permitiendo ajustes continuos para mantener la salida cerca de la referencia deseada. Características del lazo cerrado incluyen El controlador compara la salida real del sistema con la referencia deseada y toma acciones correctivas en función de esa diferencia (error). Proporciona una mayor

precisión y robustez en comparación con el lazo abierto, ya que puede compensar automáticamente las perturbaciones y las variaciones en el sistema y es más complejo y puede requerir sensores adicionales, pero es fundamental en aplicaciones donde la precisión y la estabilidad son críticas[6].

### **3.2.1. TIPOS DE CONTROL**

- Control ON-OFF

El control ON-OFF es un principio básico de control que implica la capacidad de activar (ON) y desactivar (OFF) un dispositivo, sistema o proceso de manera controlada. Este tipo de control se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones y sectores, permitiendo la gestión eficiente de la operación de equipos y la regulación de su funcionamiento según las necesidades específicas. El control ON-OFF es fundamental en la automatización de procesos, la conservación de energía y la optimización de recursos en diversos entornos, desde la industria hasta la tecnología doméstica[6].

- Control Proporcional (P):

El control proporcional es una técnica de control en la que la salida del sistema de control es proporcional al error entre la variable controlada y la referencia deseada. Es una de las formas más simples de control en lazo cerrado y se utiliza ampliamente en una variedad de aplicaciones industriales. Es proporcional al error presente en el sistema en cualquier momento dado. Cuanto mayor sea el error, mayor será la señal de control enviada al sistema. Puede proporcionar estabilidad al sistema al reducir el error hacia cero. Sin embargo, en algunos casos, puede generar un error de estado estacionario si la ganancia proporcional no está bien ajustada[7].

- Control PI

La combinación de dos sistemas de control, el controlador proporcional y el controlador integral, permite abordar diferentes aspectos del error en un sistema de lazo cerrado. El controlador proporcional, aunque efectivo en muchos casos, puede resultar en la presencia de un error estacionario. En contraste, el controlador integral corrige el error mediante la integración, una operación matemática que acumula el error a lo largo del tiempo. Esta integración produce una salida nula cuando no hay error y un valor creciente cuanto más tiempo persista el error. Aunque la operación integral no se suele estudiar en

la educación secundaria, su concepto intuitivo es simple: integrar es sumar o acumular. Así, la acción integral suma el error a lo largo del tiempo, variando hasta eliminar el error estacionario. En resumen, al depender del tiempo que el error ha estado presente, la acción integral es capaz de eliminar el error de estado estacionario en el sistema [7].

- **Control PID**

Un controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un sistema de retroalimentación empleado en el control de procesos industriales. Este tipo de controlador ajusta el error entre una medida actual y un valor objetivo al calcular el error y aplicar una acción correctiva para ajustar el proceso. El algoritmo PID se basa en tres componentes principales: proporcional, integral y derivativo. El componente proporcional ajusta la respuesta en función del error presente, el integral ajusta en función de la acumulación del error para asegurar que el error de seguimiento se reduzca a cero con un control adecuado, y el derivativo ajusta en función de la velocidad a la que cambia el error [7].

### **3.3.TIPOS DE PLCs**

Debido a la amplia gama de tipos de PLC (Controladores Lógicos Programables), los cuales se diferencian en sus funciones, capacidades, número de entradas y salidas (I/O), tamaño de memoria, características físicas, y otras especificaciones, es posible clasificarlos en distintas categorías.

#### **3.3.1. PLCs Compactos**

En la Figura 3. 1 se muestra como son las unidades compactas diseñadas para aplicaciones simples y de menor escala. Son ideales para controlar sistemas con un número limitado de E/S y con requisitos de espacio reducidos [8].



Figura 3. 1. PLCs Compactos[9]

### 3.3.2. PLCs Modulares

Se componen de módulos intercambiables que permiten una mayor flexibilidad y escalabilidad. Pueden ampliarse fácilmente añadiendo módulos de E/S adicionales, módulos de comunicación u otros componentes según sea necesario[8]. Como se muestra en la Figura 3. 2



Figura 3. 2 PLCs Modulares.[8]

### 3.3.3. PLCs de Montaje en Rack

En la Figura 3. 3 se puede apreciar el montaje de PLC en rack es un método estructural que permite la disposición y alojamiento de los componentes de un Controlador Lógico Programable en una configuración modular dentro de un chasis o rack estándar. Esta metodología ofrece múltiples beneficios en cuanto a flexibilidad, capacidad de expansión y facilidad de mantenimiento[8].



Figura 3. 3. PLCs de Montaje en rack[8]

## 3.4.CONTROL DE FASE

El control de fase es una técnica utilizada en sistemas electrónicos y eléctricos para regular la cantidad de energía suministrada a una carga mediante la modificación de la

fase de la señal de alimentación. Esta técnica es frecuentemente aplicada en el control de motores, iluminación y dispositivos de calefacción. A continuación, se describen los tipos más frecuentes de control de fase [10].

### 3.4.1. Control de Ángulo de Conducción

Control de Ángulo de Conducción por Fase: Este método ajusta el punto en el ciclo de la señal de corriente alterna (CA) donde el dispositivo de control, como un tiristor o un TRIAC, comienza a conducir. La duración de la conducción determina la cantidad de energía entregada a la carga, y es comúnmente utilizado en aplicaciones de control de velocidad de motores y atenuación de luces[10]. Como se observa en la Figura 3. 4

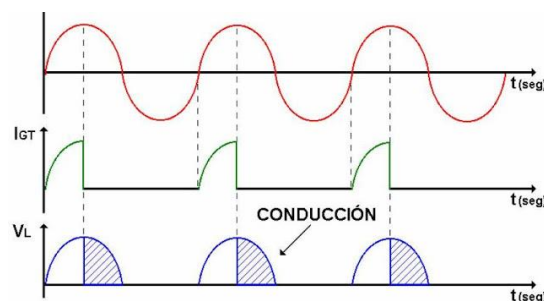


Figura 3. 4. Angulo de Conducción.[10]

### 3.4.2. Control de Onda Completa

- Control de Media Onda

En la Figura 3. 5 se puede observar que este método permite que solo la mitad del ciclo de la señal de CA se entregue a la carga. Aunque es menos eficiente, se utiliza en aplicaciones donde se puede tolerar una salida menos precisa[11].



Figura 3. 5. Control de Media onda[11]

- Control de Ciclo Completo (Burst Firing)

En este método, se entregan ciclos completos de la señal de CA a la carga de manera intermitente, siendo común en aplicaciones de calefacción donde la inercia térmica permite un control efectivo[11]. Como se puede observar en la Figura 3.6.

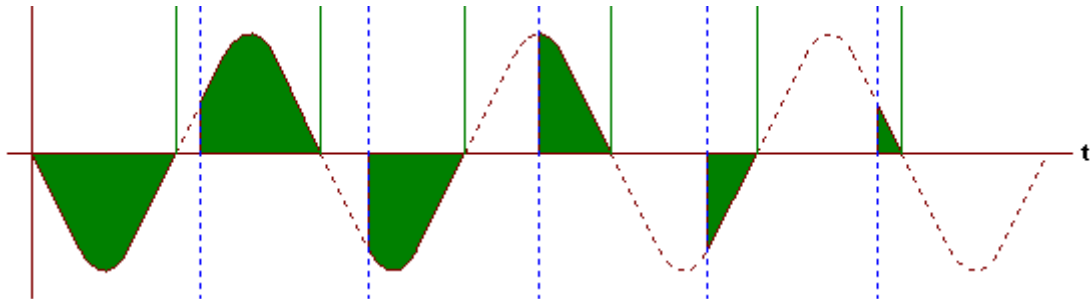


Figura 3. 6 Control de Ciclo completo[11]

### 3.4.3. Control de Cero Cruzamiento

Se puede observar en la Figura 3.7. Control de Cero Cruzamiento: Este método enciende o apaga la carga cuando la señal de CA cruza por cero voltios, minimizando así el ruido electromagnético. Es común en aplicaciones de calefacción y control de motores[10].

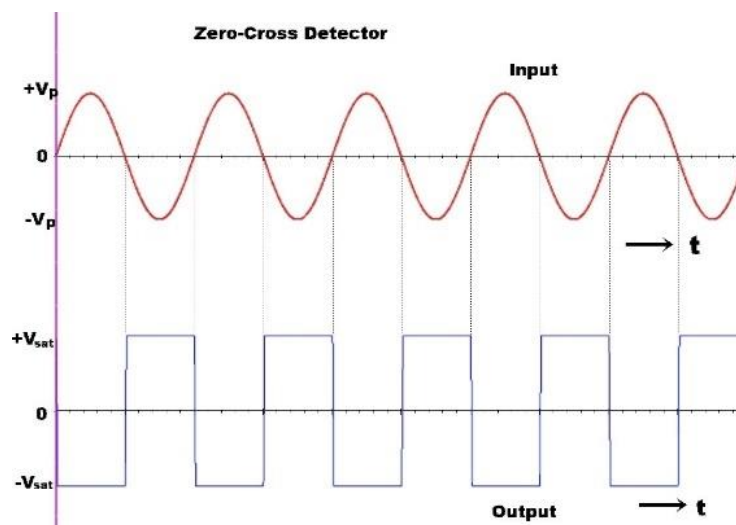


Figura 3. 7. Control de Cero Cruzamiento[10]

### 3.4.4. Control Proporcional de Fase

Control Proporcional de Fase: Este método ajusta la duración del tiempo de conducción proporcionalmente al valor de referencia o error en el sistema de control, siendo útil en sistemas que requieren un control preciso de la energía entregada[11]. Como se observa en la Figura 3.8.

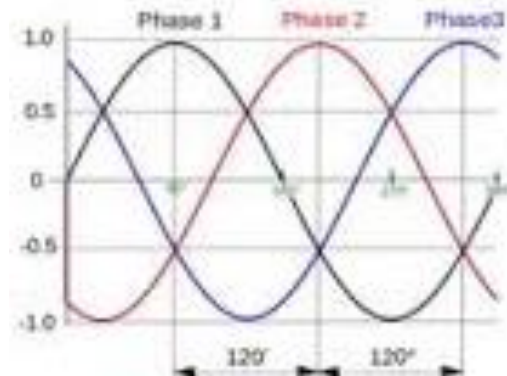


Figura 3. 8. Control Proporcional de Fase[11]

### 3.4.5. Control de Ciclo de Trabajo

En la Figura 3.9. se muestra el Control de Ciclo de Trabajo por Modulación por Ancho de Pulso (PWM): En este método, la señal de salida se modula en ancho de pulso (PWM), controlando el tiempo promedio de conducción y, por ende, la potencia entregada a la carga. Es común en el control de motores y fuentes de alimentación conmutadas[11].

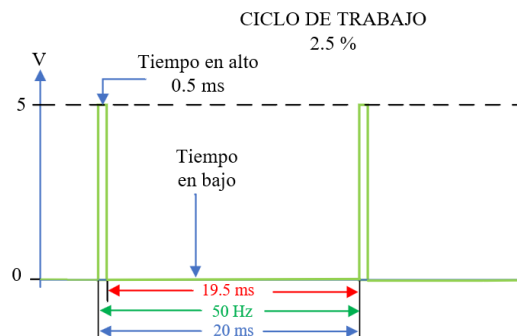


Figura 3. 9. Control Ciclo de Trabajo[11]

## 3.5. TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA

### 3.5.1. Termistores

Estos dispositivos emplean la variación de la resistencia eléctrica en función de la temperatura. Existen dos tipos principales: NTC (coeficiente de temperatura negativo) y PTC (coeficiente de temperatura positivo). Los NTC reducen su resistencia cuando la temperatura aumenta, mientras que los PTC la incrementan [12]. Como se puede observar en la Figura 3.10.

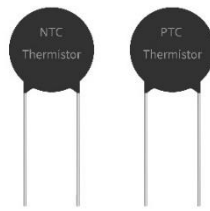


Figura 3. 10. Termistores[12]

### 3.5.2. Termopares

Como se muestra en la Figura 3.11. los termopares consisten en dos conductores metálicos diferentes que generan una pequeña corriente eléctrica cuando se encuentran a diferentes temperaturas. La magnitud de esta corriente está relacionada con la diferencia de temperatura entre los puntos de unión de los conductores[13].



Figura 3. 11. Termopares[13]

### 3.5.3. Termopilas

Como se muestra en la Figura 3.12. Son dispositivos que generan un voltaje en respuesta a gradientes de temperatura. Están formadas por una serie de termopares conectados en serie o en paralelo[13].

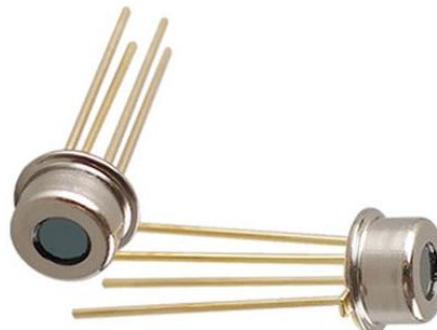


Figura 3. 12. Termopilas[13]

### 3.5.4. Sensores de Infrarrojos

Como se muestra en la Figura 3.13. Estos sensores capturan la radiación infrarroja emitida por un objeto y la transforman en una señal eléctrica, que luego se interpreta como temperatura. Son útiles para medir la temperatura de objetos a distancia sin necesidad de contacto físico[14].



Figura 3. 13.Sensores de Infrarrojo[14]

### 3.5.5. Sensores termocupla

La termocupla es un dispositivo de medición de temperatura muy común y versátil, empleado en diversos entornos científicos, industriales y de ingeniería. Su compacta dimensión y su capacidad de respuesta rápida la hacen eficiente en entornos peligrosos o difíciles, permitiendo medir de manera precisa y rápida temperaturas extremas[14]. Como se muestra en la Figura 3.14.



Figura 3. 14. Termocuplas[14]

## 4. METODOS Y PROCEDIMIENTOS

El capítulo siguiente detalla los métodos, procedimientos, materiales y condiciones experimentales que fundamentan la creación de un sistema de supervisión y control para la transferencia de calor.

### 4.1. DECLARACIÓN DE VARIABLES

- Variable dependiente  
Proceso del sistema de transferencia de calor por convección.
- Variable independiente  
Sistema de monitoreo y control.

### 4.2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología sugerida para la creación de un sistema de supervisión y control se ilustra en la Figura 4.1, la cual presenta las diversas etapas del desarrollo y el diseño.

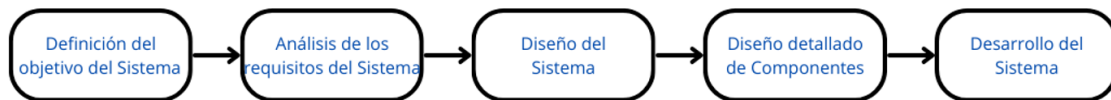


Figura 4. 1. Fases de Diseño

Las fases para el desarrollo del sistema de monitoreo inician con la definición del objetivo que cumple este sistema, es decir, se establece el objetivo que el sistema de monitoreo y control busca lograr para la transferencia de calor. Posteriormente se define los requisitos técnicos del sistema, como el rango de operación, la precisión necesaria y las especificaciones de los componentes, a continuación, la selección de los componentes, se elige sensores (de temperatura, velocidad de aire, etc.) actuadores (ventilador, niquelina, etc.) y otros componentes necesarios para el sistema, después viene el diseño del software que implementa algoritmos de control adecuados para gestionar la temperatura, desarrolla una interfaz de usuario para la visualización y control del sistema, permitiendo ajustes y monitoreo en tiempo real, seguido del desarrollo del sistema donde se ensambla y conecta los componentes del hardware de acuerdo con el diseño, se calibra los sensores para asegurar las mediciones precisas, también se implementa el algoritmo de control en el controlador y programar las funciones del sistema.

#### **4.3. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO DEL SISTEMA**

Para llevar a cabo la definición del objetivo que va tener el sistema, se centró en aspectos específicos relacionados con el control y monitoreo de la transferencia de calor, como la ineficiencia en la transferencia térmica, fluctuaciones de temperatura, o altos costos operativos, el objetivo es desarrollar un sistema automatizado para monitorear y controlar la transferencia de calor de manera eficiente mejorar la precisión de control en la temperatura optimizando el consumo de energía, reduciendo el tiempo de respuesta y asegurando la estabilidad del sistema.

#### **4.4. ANÁLISIS DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA**

Para el análisis de requisitos del sistema va a partir de los siguientes requisitos los cuales son Requisitos Técnicos, Requisitos Funcionales y de Rendimiento.

Requisitos Técnicos:

- **Sensores:** Los sensores deben tener la precisión adecuada para medir la temperatura y otras variables con el nivel de exactitud requerida cubriendo el rango de temperaturas y condiciones operativas esperadas en el sistema.
- **Controlador:** El controlador debe tener suficiente capacidad para ejecutar los algoritmos de control en tiempo real permitiendo la programación y ajuste de los algoritmos de control.
- **Interfaz de Usuario:** Debe permitir la visualización en tiempo real de la temperatura, proporcionando opciones para ajustar los parámetros, de manera que sea intuitiva y sencilla de manejar para los operadores.

Requisitos Funcionales y de Rendimiento:

- **Monitoreo:** El sistema debe proporcionar datos en tiempo real sobre la temperatura y las condiciones del sistema registrando datos históricos para análisis posteriores.
- **Control Automático:** Capacidad para mantener la temperatura dentro de un intervalo específico mediante ajustes automáticos.
- **Precisión del control:** El sistema debe mantener la transferencia de calor dentro de los límites de error definidos, reaccionando de manera ágil a las variaciones y condiciones para mantener el control adecuado.

- Escalabilidad: El sistema debe ser escalable para adaptarse a diferentes temperaturas.


#### 4.5. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

En esta sección, se describirán las características fundamentales de los dispositivos empleados en el desarrollo del módulo de perifoneo. De este modo, se pretende identificar y utilizar los dispositivos óptimos para asegurar el éxito del proyecto.

##### 4.5.1. PLC Logo!

El dispositivo más comúnmente utilizado en la industria es el LOGO de Siemens, conocido como un Módulo Lógico Inteligente. Este dispositivo permite controlar múltiples salidas a través de la programación de diversas entradas. En la Tabla 4.1 se observa sus especificaciones.


Tabla 4. 1 Características del PLC Logo![9]

DISPOSITIVO	CARACTERISTICAS
 <p>The image shows a Siemens LOGO! PLC module, a compact industrial control device. It features a small monochrome LCD screen on the left side, several push buttons for navigation and execution, and a green emergency stop button. The top of the device has a terminal block for connections, and the bottom has a DIN rail mounting bracket. The Siemens logo and 'LOGO!' branding are visible on the front panel.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo lógico con pantalla</li> <li>• Alimentación: 12/24 V</li> <li>• 8 Entradas digitales (4 convertibles en analógicas)</li> <li>• 4 salidas digitales</li> <li>• Memoria: 400 bloques</li> <li>• Expansión por módulos</li> <li>• Ethernet</li> </ul>

##### 4.5.2. Módulo de expansión de salidas analógicas

El módulo de salidas es responsable de transmitir las señales de activación y desactivación a los actuadores. En la tabla 4.2. se observa las características del módulo de expansión que se utilizara.

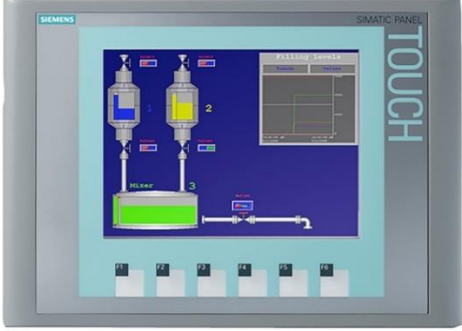
Tabla 4. 2 Característica Módulo de expansión de salidas analógicas[9]

DISPOSITIVO	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alimentación: DC 24V,</li> <li>• 2 salidas, 0-10V, 0/4-20 mA</li> </ul>

#### 4.5.3. HMI KTP600

HMI, las siglas de Interfaz Hombre-Máquina, denotan un panel mediante el cual un usuario puede interactuar con una máquina, software o sistema. Este término abarca cualquier tipo de pantalla destinada a la interacción con equipos, aunque su aplicación principal se encuentra en entornos industriales. Se puede observar sus características en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Características HMI KTP600[9]

DISPOSITIVO	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación tecla/táctil</li> <li>• Display 6 TFT</li> <li>• 256 Colores</li> <li>• Alimentación 24 DC</li> <li>• Ethernet</li> </ul>

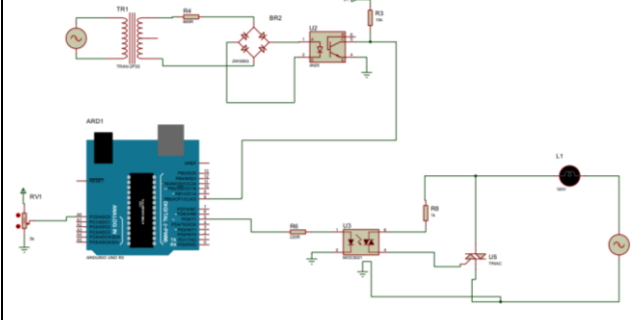
#### 4.5.4. Circuito fase

- Diseño de circuito de fase

Un "circuito de fase" constituye un conjunto organizado de elementos eléctricos diseñado específicamente para gestionar las señales de fase dentro de un sistema eléctrico. Este componente es esencial en diversos contextos como la generación, transmisión y distribución de energía, así como en sistemas de control de motores eléctricos, garantizando un manejo preciso y seguro de las formas de onda eléctricas y optimizando el rendimiento del sistema en el que se implementa.

En la Tabla 4.4. se puede observar el circuito diseñado en el software Proteus, para el diseño de la placa PCB ver el Anexo 1.


Tabla 4. 4 Características del Circuito fase

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentación 110 v</li> <li>• Señal de control 0-10 DC</li> <li>• Potencia 600 w</li> </ul>

#### 4.5.5. Termocupla tipo k

Una termocupla tipo K es un sensor de temperatura que utiliza dos metales diferentes, generalmente cromel (una aleación de níquel y cromo) y alumel (una aleación de níquel y aluminio), conectados en un extremo para generar un voltaje que varía en función de la diferencia de temperatura entre el punto de medición y el punto de conexión. Este tipo de sensor es muy utilizado en múltiples industrias debido a su amplio rango de operación (de 0 °C a +400 °C), su rápida respuesta y su resistencia a condiciones adversas, siendo esencial para la medición precisa de temperaturas en entornos industriales, científicos y comerciales. Las características de la termocupla que se utilizará están detalladas en la Tabla 4.5


Tabla 4. 5. Características de la termocupla tipo k

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termopar tipo K</li> <li>• Clase 1</li> <li>• Precisión +/-1.5°C</li> <li>• Longitud del tornillo de 10 mm</li> <li>• Diámetro del tornillo 6 mm</li> <li>• Rosca de 1/4"</li> </ul>

#### 4.5.6. Transmisor

En el sector industrial, los transmisores de temperatura son herramientas clave. Están diseñados para convertir las variaciones de tensión o resistencia relacionadas con la temperatura en señales de salida diferentes. Las especificaciones del transmisor que se empleará se detallan en la Tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Características del Transmisor

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentación 24 DC</li> <li>• Señal de 0 a 10 V</li> </ul>

#### 4.5.7. Resistencia tipo Cartucho

Las resistencias de Cartucho son resistencias que están encerradas en una caja mecánica que contiene un material aislante para garantizar un manejo más seguro de dichas resistencias. Porque son tipos industriales. Su programación mecánica proporciona una excelente transferencia de resistencia térmica, demostrando su eficacia. En la Tabla 4.13. se puede observar cómo es esta resistencia con sus características.

Tabla 4. 13 Resistencia Tipo Cartucho

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma: Cilíndrica</li> <li>• Diámetro: 12.7 mm</li> <li>• Longitud: 80mm</li> <li>• Potencia nominal: 130W</li> <li>• Tensión de Operación: 110V</li> </ul>

## 4.6. BLOQUES DE PROGRAMACION

En esta sección, se presentará una descripción de cada bloque de programación que se empleará en el desarrollo del proyecto que será realizado con el software LOGO! Soft Comfort.

### 4.6.1. Entradas

Los bloques de entrada corresponden a los terminales de entrada de LOGO!, y se dividen en dos tipos: digital y analógica, como se ilustra en la Figura 4.2.

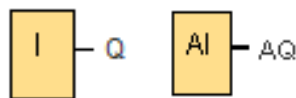


Figura 4. 2 Bloque de Entradas digital y analógica.[15]

### 4.6.2. Marcas

Los bloques de marcas proporcionan la señal de entrada en su salida. Existen dos tipos de marcas: digital y analógica, como se muestra en la Figura 4.3.

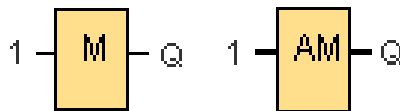


Figura 4. 3. Bloques de marca digital y analógica.[15]

### 4.6.3. Salidas

- Salida digital

Los bloques de salida corresponden a los terminales de salida de un LOGO!. La representación gráfica de este bloque se muestra en la Figura 4.4.

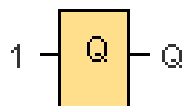


Figura 4. 4. Bloque de salida digital.[15]

- Salida Analógica

Una salida analógica está diseñada para conectarse únicamente a valores analógicos, como una función con salida analógica o una marca analógica AM. Al conectar una salida

analógica real con una función especializada que tenga salida analógica, es importante tener en cuenta que solo puede manejar valores en el rango de 0 a 1000. El símbolo de este bloque se muestra en la Figura 4.5.

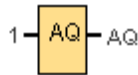


Figura 4. 5. Bloque de salida Analógica.[15]

#### 4.6.4. Función NOT

Una función NOT produce una salida de 1 cuando su entrada es 0. Este bloque NOT altera el estado de la entrada, invirtiéndolo. La representación gráfica de este bloque se encuentra en la Figura 4.6.

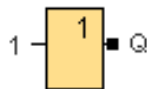


Figura 4. 6. Función NOT[15]

#### 4.6.5. Función AND

La salida de la función AND solo será 1 si todas las entradas están en estado 1, es decir, si todas están activas. Si alguna entrada del bloque no se utiliza, se le asigna automáticamente el valor de 1. La representación gráfica de este bloque se muestra en la Figura 4.7.

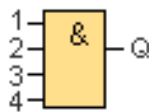


Figura 4. 7.Función AND[15]

#### 4.6.6. Función OR

La salida de una función OR toma el valor de 1 si al menos una de las entradas está en estado 1, es decir, si está activa. La representación gráfica de esta función se muestra en la Figura 4.8.

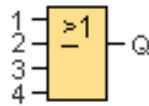


Figura 4. 8. Función OR[15]

#### 4.6.7. Multiplexor analógico

Cuando está en funcionamiento, el SFB Multiplexor analógico presenta uno de cuatro valores analógicos predefinidos, según las condiciones de entrada. La representación gráfica de este componente se muestra en la Figura 4.9.

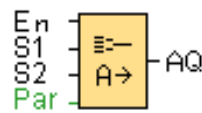


Figura 4. 9. Multiplexor analógico[15]

#### 4.6.8. Instrucción aritmética

El bloque 'Instrucción aritmética' realiza el cálculo del valor AQ basado en una ecuación compuesta por operandos y operadores establecidos por el usuario. La representación gráfica de este bloque se muestra en la Figura 4.10.

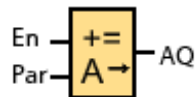


Figura 4. 10. Instrucción aritmética[15]

#### 4.6.9. Niveles fijos

- Estado 1 (Nivel alto)

Para que la entrada de un bloque mantenga siempre el estado lógico 'H', configure la entrada a hi (hi = high). La representación gráfica de esta configuración se muestra en la Figura 4.11.

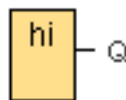


Figura 4. 11. Estado I[15]

- Estado 0 (Nivel bajo)

Para que la entrada de un bloque mantenga siempre el estado lógico 'L', configure la entrada a lo (lo = low). La representación gráfica de esta configuración se encuentra en la Figura 4.12.

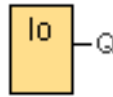


Figura 4. 12. Estado 0[15]

#### 4.6.10. Filtro Analógico

El bloque de función 'Filtro analógico' se emplea para depurar la señal de entrada analógica. La representación gráfica de este bloque se muestra en la Figura 4.13.

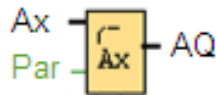


Figura 4. 13. Filtro analógico[15]

#### 4.6.11. Amplificador analógico

Esta función especializada amplifica un valor ingresado en la entrada analógica y lo transmite a la salida analógica. La representación gráfica de este bloque se muestra en la Figura 4.14.

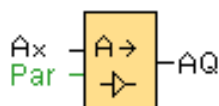


Figura 4. 14. Amplificador analógico[15]

#### 4.6.12. Regulador PI

El regulador PI combina acciones proporcionales e integrales. Puede emplearse de manera independiente en cada tipo de acción o integrarlos. La representación gráfica de este regulador se muestra en la Figura 4.15.

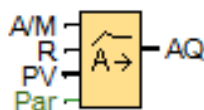


Figura 4. 15. Regulador PI[15]

## 4.7. DESARROLLO DEL SISTEMA

En este apartado una vez ya conocidos y seleccionados los componentes que se utilizarán en el desarrollo del sistema de monitoreo, se procede a realizar la programación y armar el tablero.

### 4.7.1. Estructura del sistema

En la Figura 4.16. se observa la estructura general del sistema de monitoreo y control para la transferencia de calor en donde se presenta el funcionamiento. En donde el Logo está conectado a la pantalla HMI la cual se utiliza para ingresar la temperatura a la que se quiere llegar, una vez ingresado el dato este activará el control de fases para que la resistencia de cartucho se active una vez activado la termocupla será el encargado de medir la temperatura.

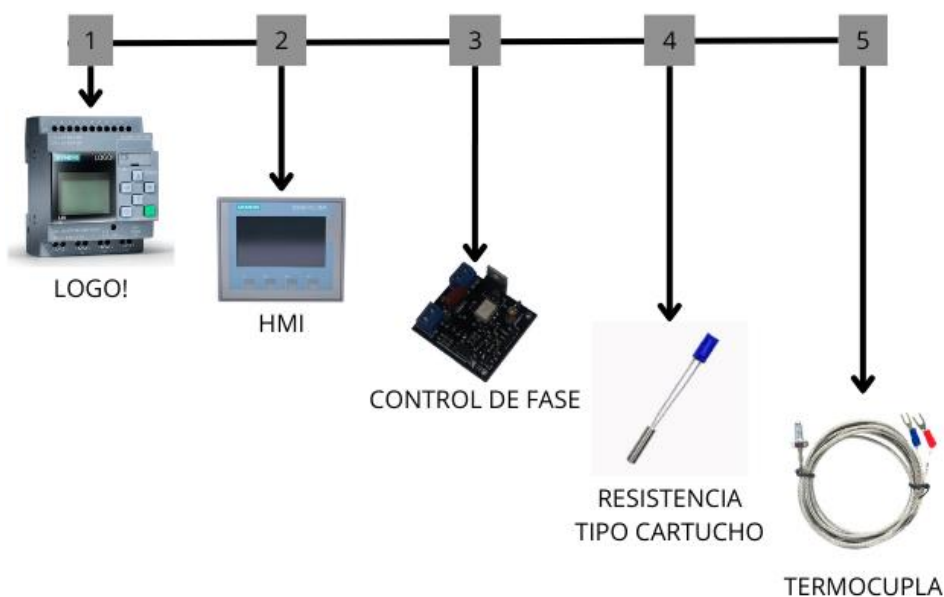


Figura 4. 16. Estructura del sistema de monitoreo y control.

### 4.7.2. Circuito eléctrico del sistema

Para la creación del sistema se necesita las conexiones del LOGO!soft y los materiales eléctricos para ello se realiza la creación de un tablero donde se van a ensamblar los elementos.

El circuito eléctrico está formado por una fuente de 12V DC (Corriente Directa) el cual está alimentando a un Logo V8.3 y a la pantalla HMI, seguido la resistencia de cartucho

está conectada al Logo, también cuenta con el control de fase alimentado a 110V AC (Corriente Alterna). Como se observa en la Figura 4.17.

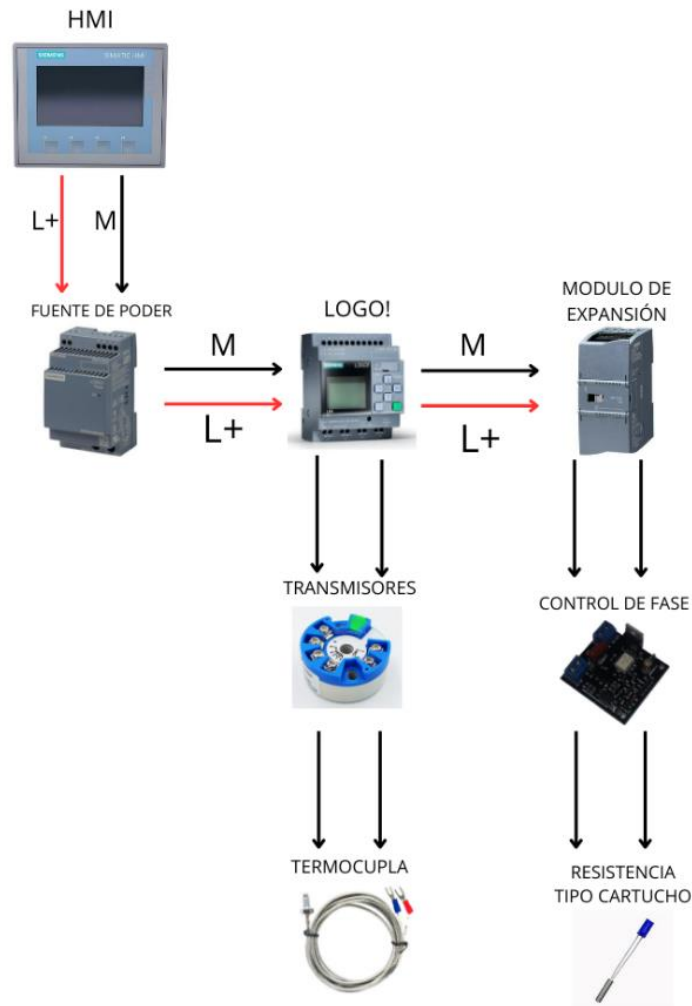


Figura 4. 17. Esquema del circuito del sistema de monitoreo y control.

#### 4.8. DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL

En la Figura 4.18 se muestra el diseño que se realizara para el modulo



Figura 4. 18. Diseño del tablero

#### 4.9. MÉTODO DE SINTONIZACION ZIEGLER NICHOLS

El procedimiento de la Regla de Sintonía de Ziegler-Nichols implica realizar pruebas para identificar dos parámetros fundamentales del sistema: el período de oscilación y el coeficiente de amplificación en el punto en el cual el sistema comienza a oscilar de manera continua. Con estos valores, es posible calcular los parámetros del controlador PID que equilibran adecuadamente la rapidez de respuesta y la estabilidad del sistema.

En particular, el controlador PI (Proporcional-Integral) es una simplificación del controlador PID que combina dos de las tres acciones del PID: Existen dos tipos de acciones: la proporcional y la integral. La acción proporcional modifica la salida del sistema según el error presente, mientras que la acción integral ajusta el error acumulado con el tiempo. Esta configuración es especialmente útil en aplicaciones donde la acción derivativa no es necesaria o se desea simplificar la implementación del controlador.

Tabla 4. 1. Ecuación Ziegler Nichols[16]

	$k_c$	$T_i$
Ziegler Nichols	$\frac{0.9}{k_m \tau_m}$	$3.33\tau_m$

como la ganancia ( $k$ ), la constante de tiempo ( $T$ ) y el tiempo muerto ( $\tau$ ).

#### 4.10. CÁLCULOS DE TRANFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se utiliza el siguiente procedimiento.

##### **Coeficiente de convección experimental.**

El coeficiente de transferencia de calor por convección experimental se determina por la ecuación 4.1

$$h_{\text{experimental}} = \frac{0.85 \cdot P}{A(T_s - T_{\infty 1})} \quad (4.1)$$

Donde:

P=potencia KW

A=área de la superficie  $m^2$

$T_{\infty 1}$ = temperatura del aire a la entrada del sistema, k

$T_s$ = temperatura de la superficie, k

Para el cálculo del área de la superficie se utilizó la ecuación.

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad (4.2)$$

Donde:

D=diámetro de la resistencia m

L= longitud de la resistencia m

##### **Coeficiente de convección teórico.**

El coeficiente de convección teórico se calcula utilizando el procedimiento establecido en la Incropera[3].

Se buscan las propiedades a partir de la temperatura pelicular con la ecuación (4.3)

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (4.3)$$

Con el valor de la temperatura pelicular se establece las propiedades del fluido a partir de la Tabla 4.2. Con las propiedades se determina el valor del número de Reynolds para definir el tipo de régimen.

Tabla 4. 2. Propiedades Termofísicas[3]

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37,3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120.	0.709

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4.4)$$

Donde:

V=velocidad de fluido m/s

D=diámetro de la resistencia m

$\nu$ =Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Con el valor de numero de Reynolds se determina el número de Nusselt utilizando las ecuaciones de Zukauskas, Churchill, Hilpert.

### Ecuación de Zukauskas

En la ecuación (4.5) las propiedades evaluadas en T<sub>∞</sub> excepto Prs

Por lo tanto, de la Tabla 4.3. Pr<10, n=0.37

Tabla 4. 3 Constantes de ecuación (4.5)[3]

$Re_D$	<b>C</b>	<b>m</b>
0.4 – 4	0.989	0.330
4 – 40	0.911	0.385
40 - 4000	0.683	0.466
4000 - 40,000	0.193	0.618
40,000 - 400,000	0.027	0.805

$$Nu_D = C * (Re_D)^m * Pr_s^n \left( \frac{Pr}{Pr_s^2} \right)^{1/4} \quad (4.5)$$

### Ecuación de Churchill

En la Ecuación (4.6) con todas las propiedades evaluadas en Tfilm

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr} \right)^{1/4} \right]} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (4.6)$$

### Ecuación de Hilpert

En la ecuación (4.7) con sus propiedades evaluada en Tfilm, y las constantes de la Tabla 4.4

Tabla 4. 4 Constantes de la ecuación (4.7)[3]

$Re_D$	<b>C</b>	<b>m</b>
1 – 40	0.75	0.4
40 - 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0.076	0.7

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (4.7)$$

Con el número de Nusselt se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección teórico.

$$h_{teórico} = Nu_D \cdot \frac{k}{D} \quad (4.8)$$

## Cálculo de error

Para el cálculo de error entre el  $h$  experimental y el  $h$  teórico se utiliza la fórmula (4.9)

$$\%Error = \frac{|h_{exp} - h_{teórico}|}{h_{exp}} * 100 \quad (4.9)$$

## 4.11. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

### 4.11.1. Anemómetro

El anemómetro es un dispositivo utilizado para medir la velocidad del viento. En este caso, se empleará para medir la velocidad que emite el blower. Figura 4.19.



Figura 4. 19. Anemómetro[17]

Tabla 4. 5 Tabla de Características del Anemómetro[17]

Velocidad de aire				
Unidad	Rango	Resolución	Umbral	Precisión
m/s	0-30	0.1	0.1	+/-5%

### 4.11.2. Termómetro Infrarrojo

El termómetro infrarrojo tipo pistola es un dispositivo que mide la temperatura de un objeto a distancia mediante la detección de radiación infrarroja que emite el objeto. Este será utilizado para comprobar la señal de temperatura que nos da la termocupla. Se puede observar el instrumento de medición en la Figura 4.20.



Figura 4. 20. Termómetro Infrarrojo[18]

Tabla 4. 6 Características Termómetro Infrarrojo[18]

Temperatura			
Unidad	Rango	Resolución	Exactitud
°C	-50°C a 600°C	500mSec	+/-1.5°C

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza los datos obtenidos del sistema que permite identificar áreas de mejora, validar el rendimiento del control PI y evaluar la capacidad del sistema para mantener las condiciones térmicas dentro de los parámetros deseados.

### 5.1. TABLERO DE CONTROL

En la Figura 5.1. se muestra el resultado final del diseño de la Figura 4.18 que se realizó el proceso de la conexión ver el Anexo 2.



Figura 5. 1. Modelo final del Tablero de Control

### 5.1.1. Conexiones del tablero de control

En la Figura 5.2. se puede observar el tablero de control con sus componentes para el esquema de conexiones ver el Anexo 3.



Figura 5. 2. Tablero de control parte posterior

### 5.2.CIRCUITO DE FASE

En la Figura 5.3. se puede apreciar el Circuito de Fase ya terminado para el esquema de su conexión revisar el ANEXO1.

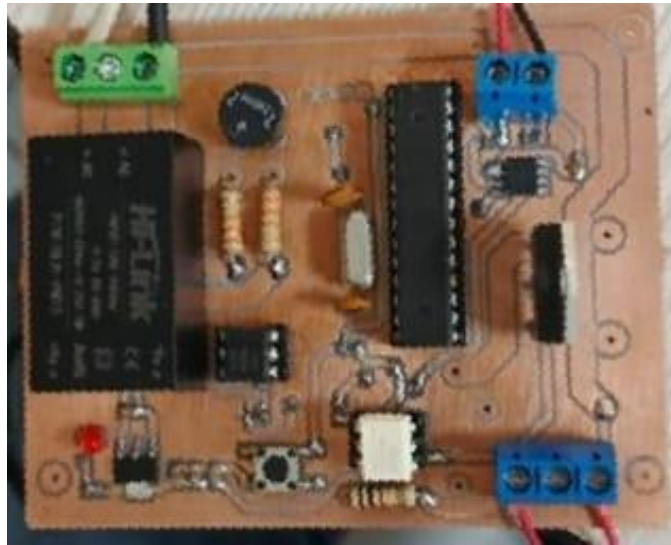


Figura 5. 3. Circuito de Fase

### 5.2.1. Prueba del Circuito de Fase

Mediante la prueba del circuito de fase, se logró verificar el correcto funcionamiento del control de onda al aplicarse a una carga resistiva, específicamente una resistencia tipo cartucho. Esta prueba permitió confirmar su debido funcionamiento, en la Figura 5.4. podemos apreciar las ondas controladas Anexo 4.

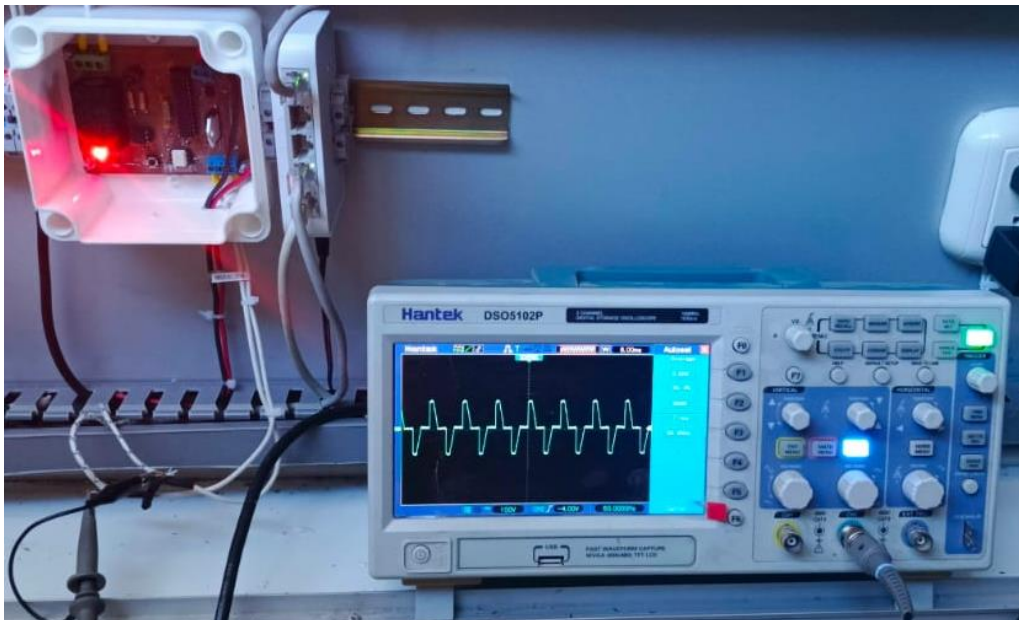


Figura 5. 4 Onda Controlada

### 5.3.CALIBRACIÓN DE TERMOCUPLAS

La calibración de las termocuplas Tabla 4.5. se llevó a cabo utilizando los transmisores Tabla 4.6. y el amplificador analógico Figura 4.14. integrado en el sistema de programación LOGO. Este procedimiento asegura una medición precisa y confiable al ajustar los sensores a las condiciones específicas del entorno experimental.

#### 5.3.1. Parámetros del Amplificador Analógico

Para determinar los parámetros necesarios para la calibración del amplificador analógico, se aplicó un enfoque basado en la ecuación (5.1) de la recta. Se utilizó esta ecuación para ajustar los datos experimentales y calcular los coeficientes necesarios para una representación precisa de la transferencia de la señal del amplificador.

$$y = mx + b \quad (5.1)$$

m= Gain

b=offset

La termocupla utilizada tiene un rango de medición de 0 a 400 grados Celsius, lo que se traduce en los valores  $x_1=0$  y  $x_2=400$  grados. El transmisor asociado proporciona un voltaje en el intervalo de 2 a 10 voltios, correspondientemente,  $y_1=2$  y  $Y_2 =10$  voltios. Por lo tanto, los puntos de referencia en el sistema de coordenadas son A (0,2) y B (400,10), los cuales definen la relación entre la temperatura y el voltaje.

Utilizando el software GeoGebra, podemos obtener de manera más eficiente la ecuación de la recta ajustada a nuestros datos. En este caso, la ecuación resultante es  $y=0.02x+2$ . GeoGebra facilita el proceso al permitir la visualización gráfica y el ajuste preciso de la recta, optimizando así el análisis y la interpretación de los datos. Como se muestra en la Figura 5.5.

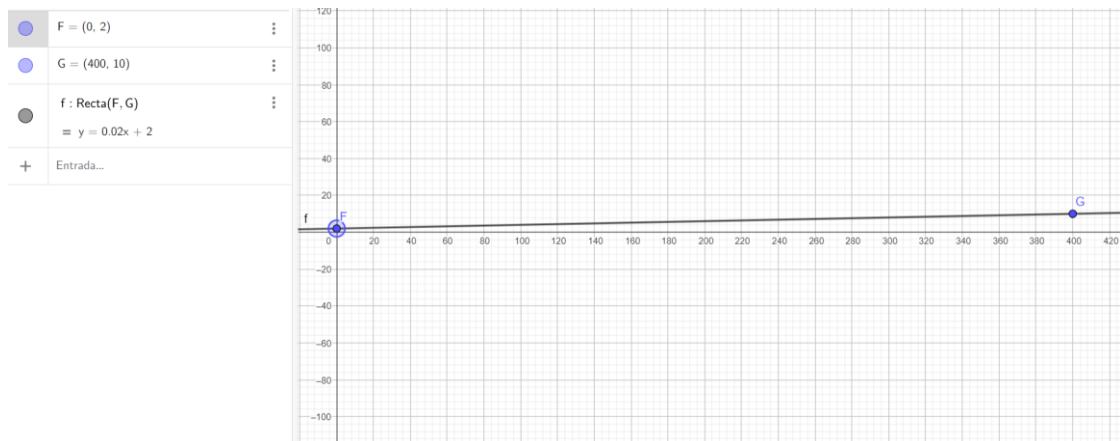


Figura 5. 5. Ecuación de la recta en GeoGebra

Con los datos obtenidos de la ecuación de la recta, podemos introducir estos parámetros en el amplificador analógico utilizando el software Logosoft Comfort como se puede observar en la Figura 5.6. Este procedimiento nos permite ajustar de manera precisa la configuración del amplificador para asegurar una correcta calibración y correspondencia entre las mediciones de temperatura y el voltaje.

The figure shows the "Parámetros" (Parameters) window in the Logosoft Comfort software. The window has two tabs: "Parámetros" and "Comentario". The "Parámetros" tab is active. The interface includes the following sections and fields:  
 - **Parámetro:** "Nombre de bloque:" (empty text field).  
 - **Sensor:** "Sensor:" dropdown menu set to "0 ... 10 V".  
 - **Configuración analógica:**  
 - **Rango de medida:** "Mínimo:" set to 2, "Máximo:" set to 202.  
 - **Parámetro:** "Gain:" set to 0,20, "Offset:" set to 2.  
 - **Posiciones decimales:** "Decimales en el texto de aviso:" set to 0, with a secondary value of +12345.  
 - **Otros:** "Protección activa" checkbox is unchecked.  
 At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Ayuda".

Figura 5. 6. Parámetros en el Amplificador Analógico

### 5.3.2. Pruebas de termocuplas

Una vez que las termocuplas hayan sido correctamente reguladas, se procederá a realizar las pruebas utilizando el termómetro infrarrojo Figura.4.20. como se observa en la Figura 5.7.



Figura 5. 7. Pruebas de Temperatura

## 5.4. CALIBRACIÓN DEL CONTROL PI

### 5.4.1. Regla de Sintonía Ziegler Nichols

Para iniciar la sintonización, se procede a recolectar datos en modo de lazo abierto, operando al 50% de la capacidad nominal de la resistencia tipo cartucho. Para obtener los parámetros necesarios, tales como la ganancia ( $K$ ), la constante de tiempo ( $T$ ) y el tiempo muerto ( $\tau$ ), se utiliza la aplicación System Identification del software MATLAB. Esta herramienta facilita la estimación precisa de estos valores a partir de los datos recolectados.

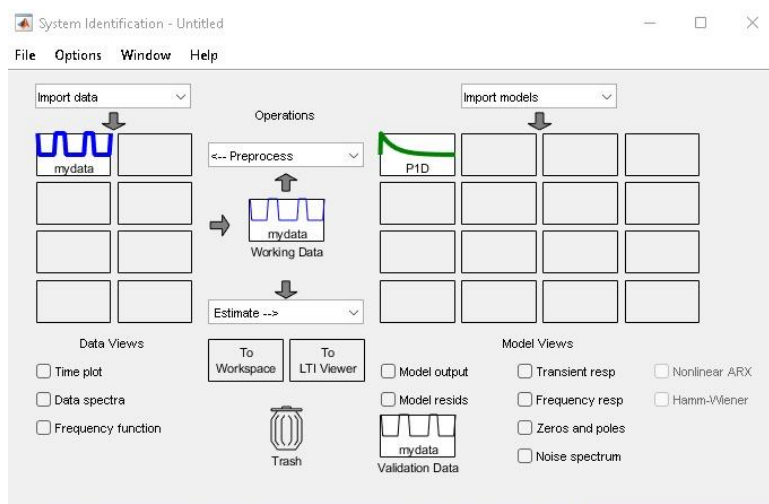


Figura 5. 8 System Identification del software MATLAB.

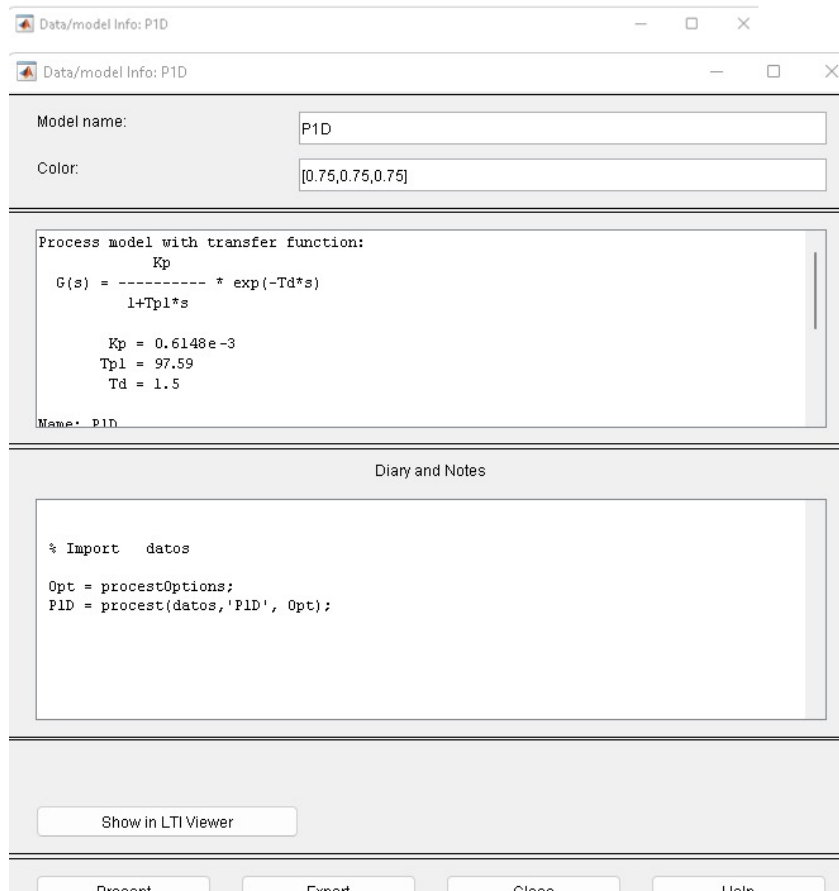


Figura 5. 9 Valores Para el Cálculo de Ziegler Nichols

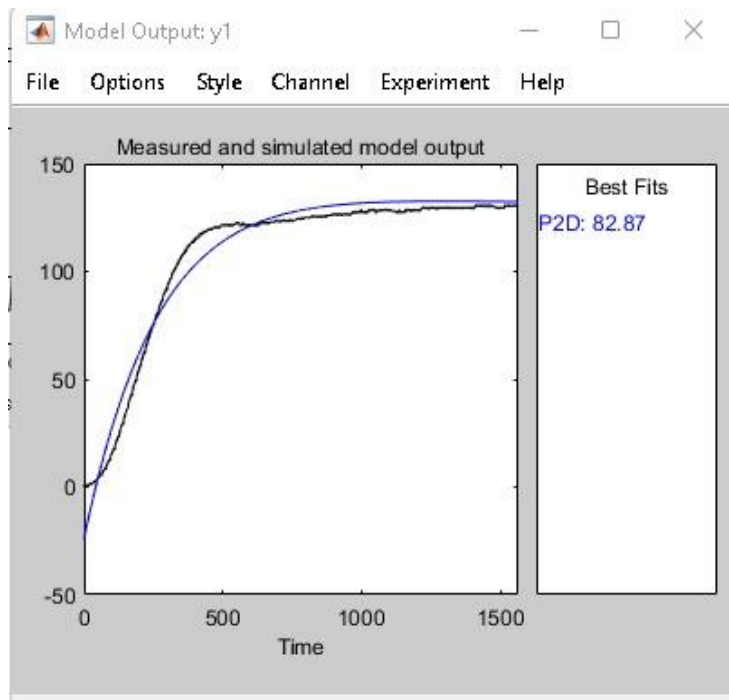


Figura 5. 10 Comportamiento de control

Una vez obtenidos los valores de ganancia (k), constante de tiempo (T) y tiempo muerto ( $\tau$ ), se procedió a sustituir estos parámetros en las fórmulas correspondientes para determinar las constantes del regulador proporcional-integral (PI).

Remplazamos los datos de las fórmulas de la Tabla 4.1.

$$k_m = 0.6148 \times 10^{-3}$$

$$\tau_m = 97.59$$

$$k_c = \frac{0.9}{k_m \tau_m} = 15$$

$$T_i = 3.33 \tau_m = 325s = 5 \text{ min } 25s$$

Designamos los cálculos en el controlador PI de logo como se muestra en la Figura 5.11.

Parámetro:

Juego de parámetros: Usuario definido

Ganancia del regulador (KC): 15,00

Tiempo integral (TI): 5 : 25 Minutos (m:s)

Sentido (Dir):  Hacia arriba (+)  
 Hacia abajo (-)

Figura 5. 11 Designación de Datos del controlador PI

#### 5.4.2. Prueba de funcionamiento

Procedemos a graficar los datos recolectados del controlador Pi para facilitar su análisis visual Como se observa en la Figura 5.12.

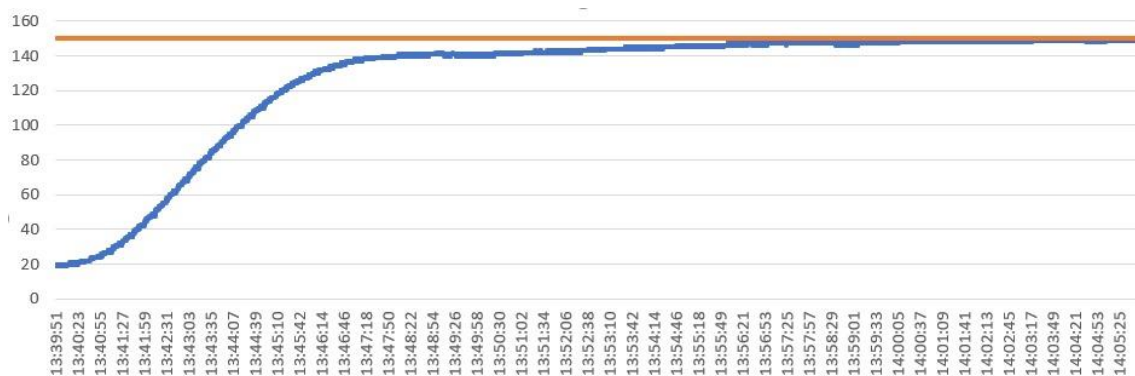


Figura 5. 12.sintonización de Ziegler Nichols

### 5.4.3. Pruebas de tiempo de control PI

Realizamos pruebas con diferentes temperaturas para analizar el tiempo necesario para que el sistema se estabilice. Los resultados de estas pruebas están detallados en la Tabla 5.2. y en el Anexo 5.

Tabla 5. 1. Tiempo de estabilización

TEMPERATURA	TIEMPO
85°C	10min
125°C	13min
180°C	17min

## 5.5.PROGRAMACIÓN

En esta sección se detallará la programación desarrollada en el software LOGO!Soft Comfort, abordando tanto el proceso de programación por partes como el resultado final obtenido. Este análisis es fundamental para comprender el diseño y la implementación del sistema automatizado, y se proporciona un Anexo 6 con las capturas de pantalla correspondientes para una visualización más detallada.

### 5.5.1. Desarrollo de la Programación

En el desarrollo de la programación para el funcionamiento del sistema se utilizó el software LOGO!soft V8, Tia Portal V16 . A continuación, se muestra cómo se realizó el diseño de la programación en LOGO!soft. En la Figura 5.13. se muestra el icono del software.



Figura 5. 13. Software

En el software se va utilizar la programación por bloques, en donde se empieza con la entrada I6 que será asignada y específicamente para el paro de emergencia de todo el sistema. Como se puede observar en la Figura 5.14.

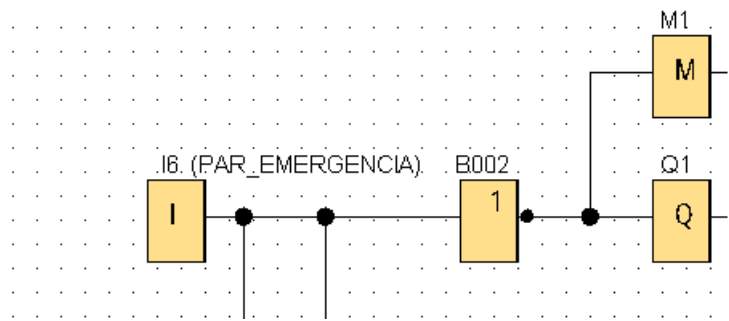


Figura 5. 14.Paro de Emergencia.

Seguido la entrada I5 es asignada para el control manual y automático de la resistencia de cartucho. En la Figura 5.15. se puede observar la programación por bloques.

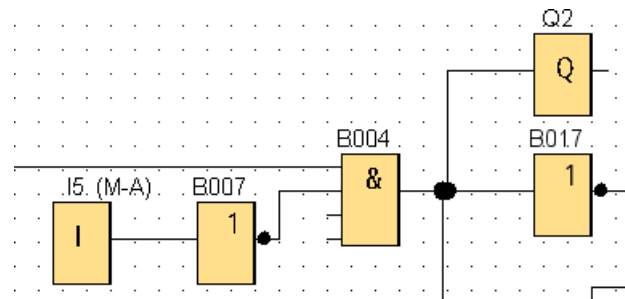


Figura 5. 15.Programación de la resistencia de cartucho

Posteriormente, la entrada I3 es crea para el Blower en donde se utiliza también la marca M3 que sirve para controlar desde el HMI. Como se muestra en la Figura 5.16.

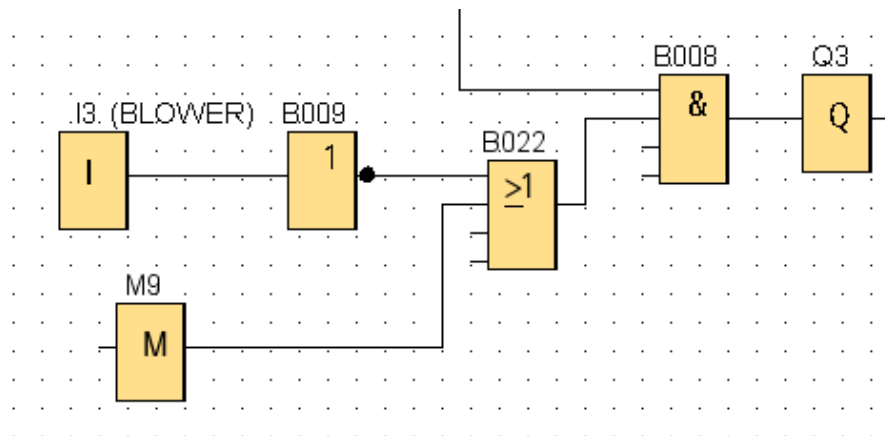


Figura 5. 16.Programación para el blower

Continuando se va a utilizar la entrada I4 la cual encenderá la resistencia de cartucho al 100% para obtener la temperatura deseada. En la Figura 5.17. se tiene la variable en bloques de la resistencia.

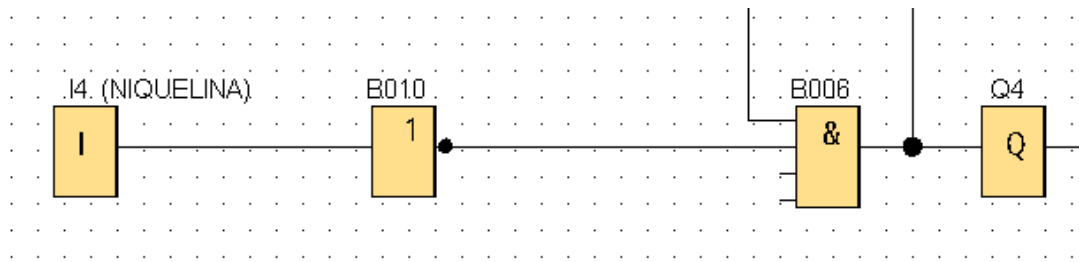


Figura 5. 17.Programación para la resistencia de cartucho.

Una vez realizado se necesita una sección para el control PI de la resistencia. En la Figura 5.18. se observa la sección del control PI

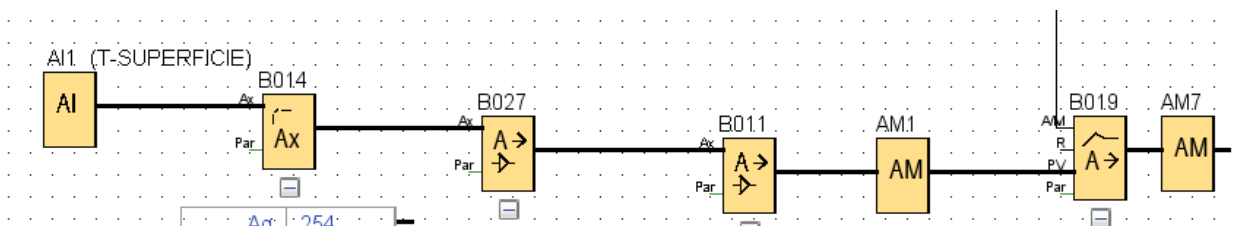


Figura 5. 18.Sección control PI

En la Entrada Analógico AI4 se muestra el valor de la temperatura que da la termocupla en la variable (T-infinita2). En la Figura 5.19. se muestra la sección de este valor.

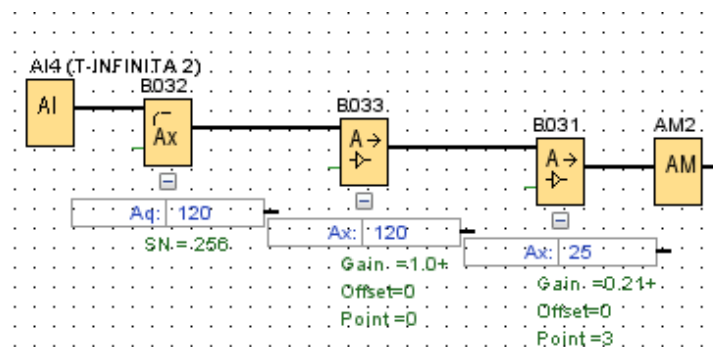


Figura 5. 19. Temperatura infinita2 termocupla.

Una vez hecho esto la entrada Analógica AI1 se utiliza para la temperatura de superficie la cual es controlada con el PI de la resistencia de cartucho. En la Figura 5.20. se puede observar cómo se hizo la programación.

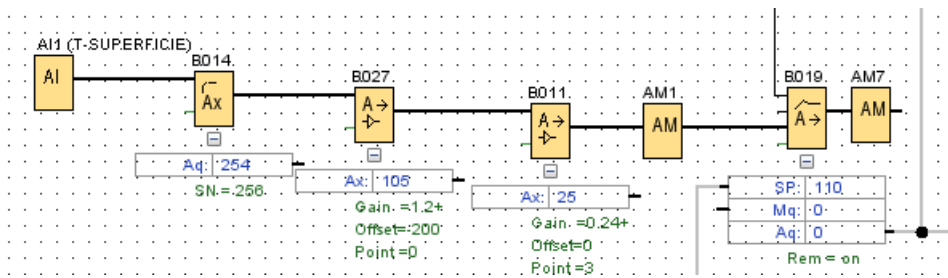


Figura 5. 20.Temperatura de superficie

Seguido tenemos la sección del cálculo del coeficiente de convección para ello en la formula se utiliza la temperatura de la superficie y la temperatura infinita. Como se puede observar en la Figura 5.21.

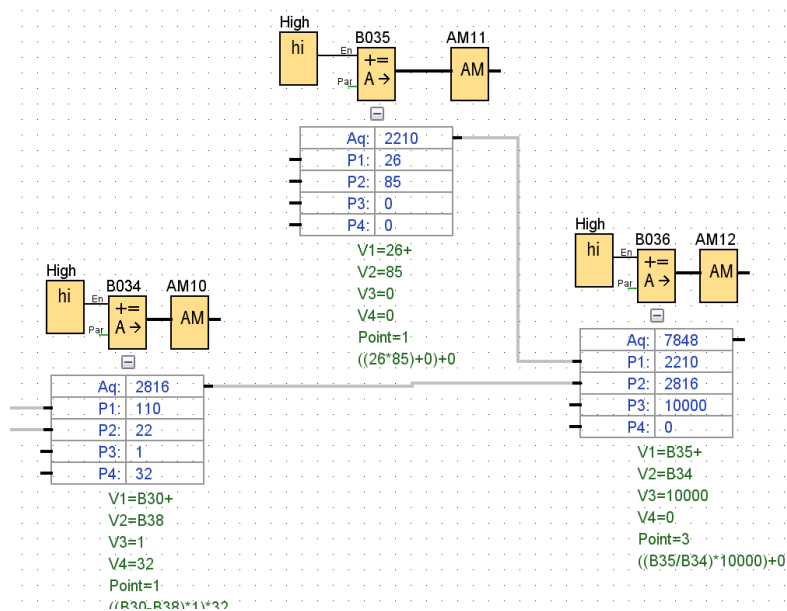


Figura 5. 21.Cálculo del coeficiente de convección.

Por último, en la entrada analógica AI3 es la temperatura ambiente (t-infinita). En la Figura 5.22. se muestra esta temperatura.

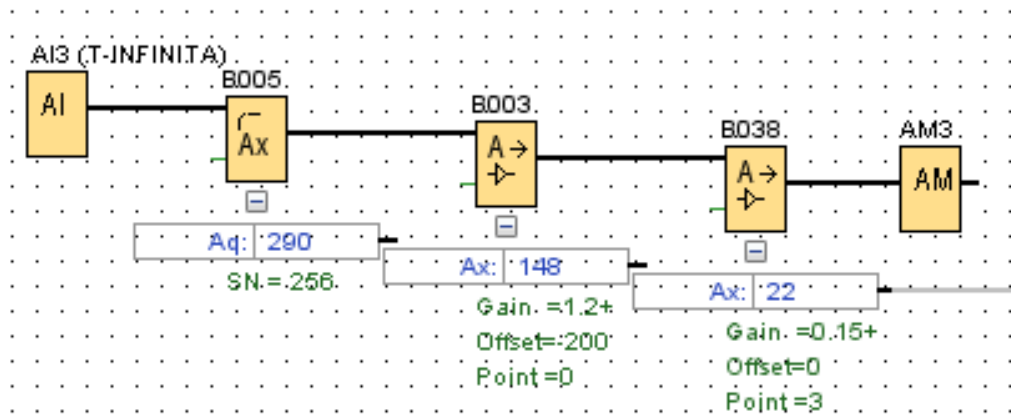


Figura 5. 22.Programación Temperatura Ambiente.

### 5.5.2. Interfaz para la Interacción de la pantalla HMI

En este caso la interfaz con la que se va a trabajar será una pantalla HMI, el cual se lo va a crear en TIA PORTAL V.16

Para crear la pantalla HMI se empieza creando un nuevo proyecto, como se puede observar en la Figura 5.23.

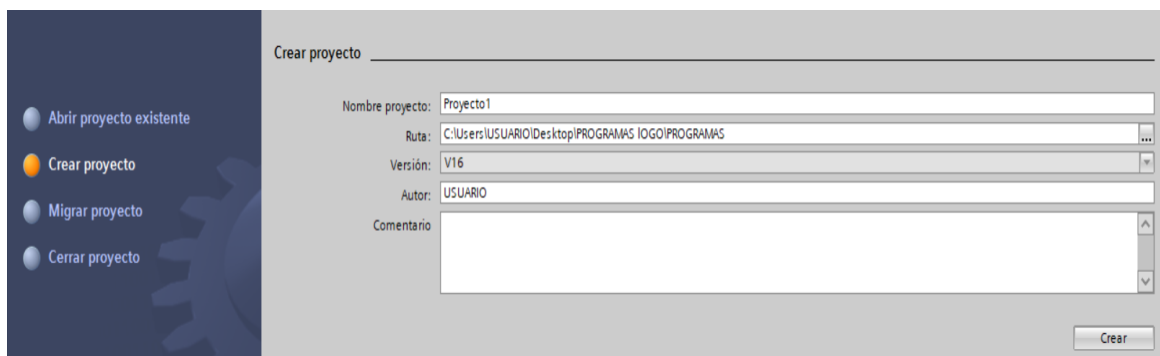


Figura 5. 23.Creación del proyecto HMI

Una vez creado el proyecto se selecciona la pantalla con la cual se va a trabajar en la Figura 5.24. se muestra la pantalla con la que se va a trabajar en este caso KTP-600 Siemens.

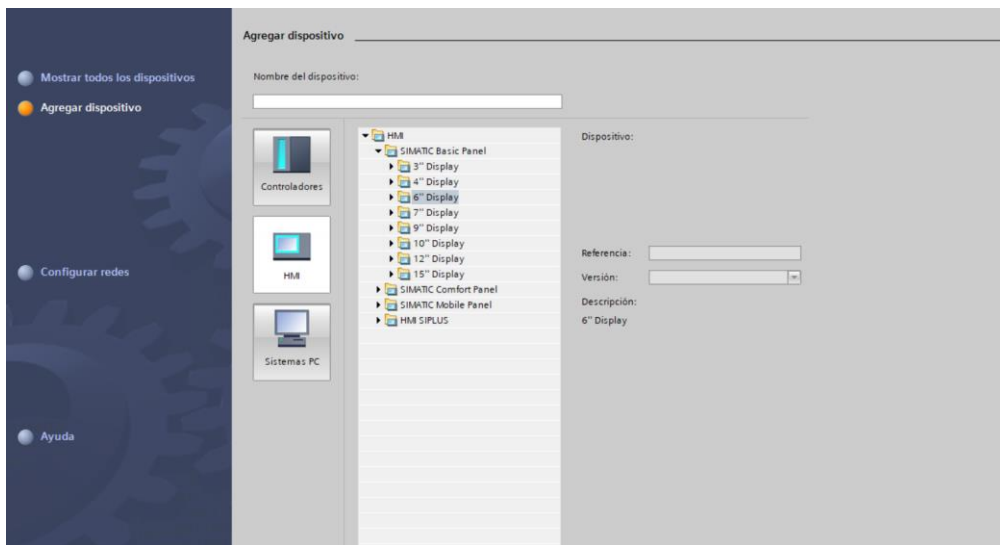


Figura 5. 24.Selección de la pantalla HMI.

A continuación, se diseña el estilo de la pantalla HMI en la Figura 5.25. se muestra la pantalla HMI en donde se crea el diseño, insertando los elementos que apareceran en la pantalla, la Figura 5.26. muestra los elementos que se veran en la pantalla al momento de ejecutar.

Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Conexión	Nombre del PLC	Variable PLC	Dirección
C_V	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 50
denominador	Tabla de variables estándar	Word	LOGO		<No definido>	VW 40
IND-SET-POINT	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 34
M1	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.0
M10	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 1.1
M11	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 1.2
M2	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.1
M3	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.2
M4	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.3
M6	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.5
M7	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 0.6
M9	Tabla de variables estándar	Bool	LOGO		<No definido>	M 1.0
numerador	Tabla de variables estándar	Word	LOGO		<No definido>	VW 36
POT-ING	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 52
SET-POINT	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 28
TEM-FILM	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 4
TEM-HNF	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 8
TEM-SUP	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 6
VELOCIDAD	Tabla de variables estándar	Int	LOGO		<No definido>	VW 24

Figura 5. 25.Elementos de la pantalla HMI.

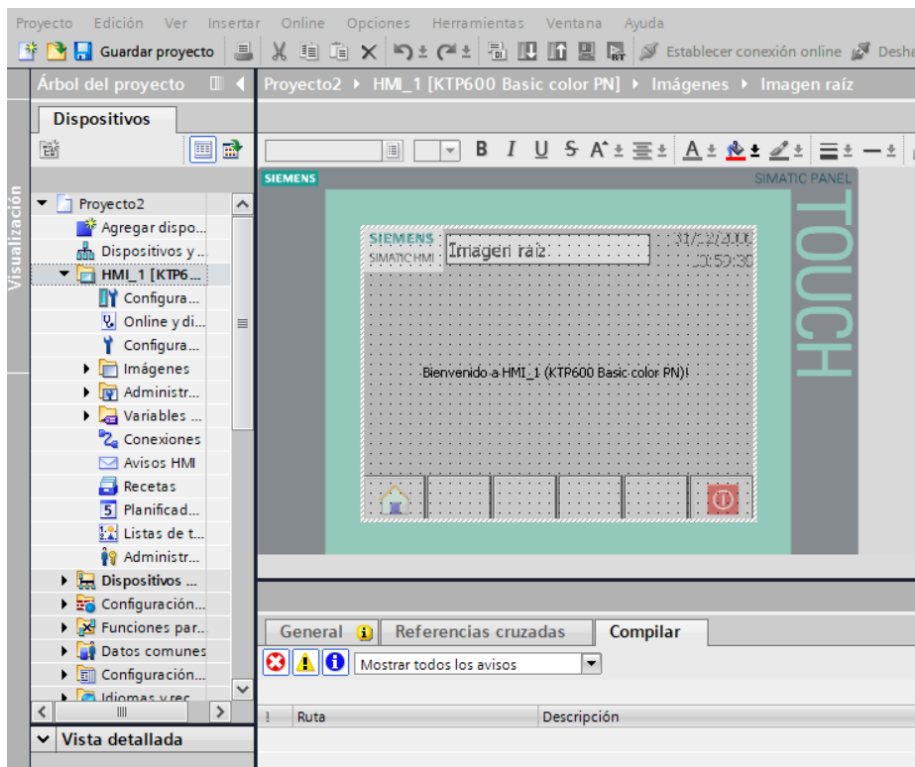


Figura 5. 26.Pantalla HMI

En la Figura 5.27.se muestra el diseño de la pantalla al iniciar.



Figura 5. 27.Pantalla inicial del HMI

En el Anexo 7. Se muestra los diseños de las pantallas HMI del sistema de monitoreo y control.

### 5.5.3. Conexión del Logo al HMI

Para las conexiones del Logo con la pantalla HMI se utilizará el software LOGO! soft en donde se declara las variables para posteriormente hacer las conexiones respectivas. En la Figura 5.28. se muestra como están declaradas las variables en el software.

ID	Bloque	Parámetro	Tipo	T
1	B011 [Amplificador analógico]	Ax, amplificado	Word	6
2	B037 [Instrucción aritmética]	AQ amplificada	Word	24
3	B020 [Instrucción aritmética]	V1	Word	26
4	B031 [Amplificador analógico]	Ax, amplificado	Word	4
5	B030 [Instrucción aritmética]	V1	Word	28
6	B020 [Instrucción aritmética]	V1	Word	20
7	B012 [Amplificador analógico]	Ax, amplificado	Word	34
8	B034 [Instrucción aritmética]	AQ amplificada	Word	40
9	B036 [Instrucción aritmética]	AQ amplificada	Word	36
10	B038 [Amplificador analógico]	Ax, amplificado	Word	8
11	B043 [Instrucción aritmética]	AQ amplificada	Word	50
12	B035 [Instrucción aritmética]	V1	Word	52
13				

Figura 5. 28.Declaración de variables en el HMI

Una vez declarada las variables se conecta el logo con la pantalla HMI para visualizar los datos que se necesita. En la Figura 4.21. se observa las conexiones de los elementos.

### 5.6. VELOCIDAD DE BLOWER

La velocidad del blower se estableció en su apertura máxima, que es de 10 m/s ver Anexo 8. Este valor fue obtenido mediante mediciones realizadas con un anemómetro Figura 4.19.

Durante el funcionamiento del blower, se ha observado un fenómeno en el que se produce un incremento de la temperatura en el flujo de aire, alcanzando un aumento de 2°C como se puede observar en la Figura 5.29. Este incremento de temperatura puede ser atribuido a varios factores, incluyendo la generación de calor por el propio equipo y las condiciones específicas del entorno de operación.



Figura 5. 29. Prueba de Temperatura

### 5.7. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Los datos lo recolectamos del módulo como se muestra en la Figura 5.30.



Figura 5. 30 Datos con la temperatura de 180°C

El coeficiente de transferencia de calor por convección experimental se determina por la ecuación 4.1 Y 4.2

$$A = \pi \cdot 0.013m \cdot 0.08m = 0.0032m^2$$

$$h_{experimental} = \frac{0.85 * 64}{0.0032(453.15K - 291.15K)} = 106.25 \frac{W}{m^2K}$$

#### Coefficiente de convección teórico.

Se buscan las propiedades a partir de la temperatura pelicular con la ecuación (4.3)

$$T_f = \frac{453.15 + 293.15}{2} = 373.15K$$

Con el valor de la temperatura pelicular se establece las propiedades del fluido a partir de la Tabla 4.2. Con las propiedades se determina el valor del número de Reynolds para definir el tipo de régimen.

$$Re_D = \frac{10 \frac{m}{s} * 0.013 m}{15.28 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 8.508 * 10^3$$

Con el valor de numero de Reynolds se determina el número de Nusselt utilizando las ecuaciones de Zukauskas, Churchill, Hilpert.

### **Ecuación de Zukauskas**

En la ecuación (4.5) las propiedades evaluadas en  $T_\infty$  excepto  $Pr_s$

Por lo tanto, de la Tabla 4.3.  $Pr < 10$ ,  $n=0.37$

$$Nu_D = 0.26 * (8.508 * 10^3)^{0.6} * 0.685^{0.37} \left( \frac{0.708}{0.685} \right)^{\frac{1}{4}} = 52.597$$

### **Ecuación de Churchill**

En la Ecuación (4.6) con todas las propiedades evaluadas en  $T_{film}$

$$Nu_D = 0.3 + \frac{(0.62 * 7.139 * 10^3)^{1/2} 703^{1/3}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{703} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{7.139 * 10^3}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} = 44.427$$

### **Ecuación de Hilpert**

En la ecuación (4.7) con sus propiedades evaluada en  $T_{film}$ , y las constantes de la Tabla 4.4

$$Nu_D = 0.139 * (7.139 * 10^3)^{0.618} 703^{\frac{1}{3}} = 41.313$$

Con el número de Nusselt se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección teórico.

$$h_{teórico} \text{ de Zukauskas} = 104.183 \frac{W}{m^2 K}$$

$$h_{teórico} \text{ de Churchill} = 95.723 \frac{W}{m^2 K}$$

$$h_{teórico} \text{ de Hilpert} = 89.014 \frac{W}{m^2 K}$$

### Cálculo de error

Para el cálculo de error entre el h experimental y el h teórico se utiliza la formula (4.9)

$$\%Error \text{ de Zukauskas} = 1.945\%$$

$$\%Error \text{ de Churchill} = 10.318\%$$

$$\%Error \text{ de Hilpert} = 16.541\%$$

Entre las ecuaciones experimental y la de Zukauskas, presentan un error del 1.945 %, lo que la convierte en la que menos margen de error tiene.

### 5.8. DEMOSTRACION PRÁCTICA

Se llevó a cabo una prueba del módulo con la participación de estudiantes de la asignatura de Termodinámica, bajo la supervisión del ingeniero responsable del curso como se muestra en la Figura 5.31. y en el Anexo 9.



Figura 5. 31.Demostración Práctica

Los datos obtenidos del módulo son esenciales para comparar el valor de  $h$  experimental con el valor de  $h$  matemático reportado por diversos investigadores.

Para consultar la guía práctica, véase el Anexo 10. Para el manual de operación y mantenimiento, consulte el Anexo 11.

## 5.9. ANÁLISIS DE COSTOS

En esta sección, realizaremos un análisis de los costos directos e indirectos asociados con el desarrollo del sistema de monitoreo y control.

### 5.9.1. Costos Directos

En la Tabla 5.2. se muestra a detalle el costo de los materiales empleados en el sistema de monitoreo y control.

Tabla 5. 2. Costos Directos

<b>Sistema de monitoreo y control</b>				
<b>N°</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elementos</b>	<b>Precio Unit.</b>	<b>TOTAL</b>
1	3	Termocuplas	\$ 15.00	\$ 45.00
2	3	Transmisores	\$ 60.00	\$ 180.00
3	1	Resistencia tipo cartucho	\$ 30.00	\$ 30.00
4	1	PLC Logo!	\$ 160.00	\$ 160.00
5	1	Fuente de voltaje siemens	\$ 90.00	\$ 90.00
6	1	Módulo de expansión siemens	\$ 160.00	\$ 160.00
7	1	Control de fase	\$ 30.00	\$ 30.00
8	1	HMI siemens 6"	\$ 250.00	\$ 250.00
9	1	Ethernet switch	\$ 11.00	\$ 11.00
10	5	Luz piloto	\$ 2.50	\$12.50
11	1	Paro de emergencia	\$ 3.50	\$3.50
12	4	Selectores 2 posiciones	\$ 2.80	\$11.20
13	2	Voltímetros	\$ 3.50	\$7.00
14	2	Breakers	\$ 6.00	\$12.00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 1002.20</b>

### 5.9.2. Costos indirectos

Para esta sección se utilizará el número de horas y los días que se trabajó en la Tabla 5.3. se observan los gastos indirectos.

Tabla 5. 3. Costos indirectos

<b>Días de trabajo</b>	<b>Actividad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>TOTAL</b>
30	Programación PI	\$ 20	\$ 600.00
10	Diseño y construcción del panel de control	\$ 20	\$ 200.00
15	Pruebas de funcionamiento	\$ 20	\$ 300.00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 1100.00</b>

El costo final del sistema de monitoreo y control para la transferencia de control es **\$2102.20** dólares americanos

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

- El sistema de control PI demuestra un rendimiento efectivo en la regulación de temperaturas, logrando estabilizar las temperaturas mínimas en un tiempo de 10 minutos y las temperaturas máximas en 17 minutos. Esto indica que el control PI es eficiente para mantener las temperaturas dentro de los rangos deseados con un tiempo de respuesta adecuado.
- Entre el coeficiente de transferencia de calor por convección experimental y los coeficientes teóricos evaluados, la ecuación de Zukauskas es la que presenta el menor porcentaje de error, con un valor de 1.945 %. Esto sugiere que la ecuación de Zukauskas proporciona una representación más precisa en comparación con las otras ecuaciones analizadas.
- En la práctica realizada, se observó que al forzar el sistema las aspas ejercen una fuerza sobre las moléculas del aire generando fricción causando un aumento en la temperatura ambiente de 2 °C.
- El costo final del sistema de monitoreo y control para la transferencia de calor por convección es de \$2102.20, lo cual incluye tanto los elementos físicos del sistema como los costos asociados al diseño, programación y pruebas necesarias.

## 6.2.RECOMENDACIONES

- Establecer un programa de mantenimiento preventivo y correctivo para el sistema de monitoreo y control. Esto asegurará que todos los componentes funcionen de manera óptima y se minimicen las interrupciones en las prácticas educativas.
- Es fundamental ofrecer talleres y capacitaciones periódicas para estudiantes y profesores sobre el uso y la programación del sistema automatizado. Esto no solo mejorará la competencia técnica, sino que también fomentará un uso más efectivo de la herramienta en el aprendizaje y la investigación.
- Se sugiere realizar una evaluación anual de los equipos y tecnologías utilizados en el sistema. La incorporación de nuevas tecnologías y la actualización de los componentes existentes pueden mejorar aún más la eficiencia y la funcionalidad del sistema.
- Incentivar a los estudiantes y profesores a desarrollar proyectos de investigación que utilicen el sistema de monitoreo y control. Esto no solo enriquecerá el aprendizaje, sino que también contribuirá al avance del conocimiento en el área de transferencia de calor.

## 7. REFERENCIAS

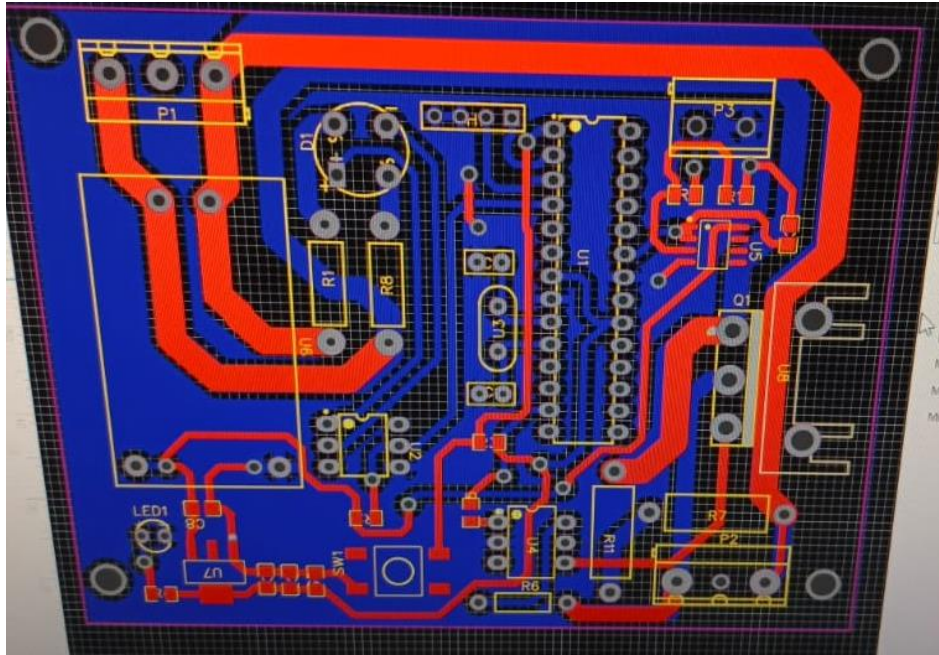
- [1] Y. A. Cengel Y M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ma Ed. México, 2012.
- [2] J. P. Holman, *Transferencia De Calor*, 10ma Ed. Mexico, 1999.
- [3] Incropera Frank P. Y Dewitt David P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Vol. 7. 2013.
- [4] J. E. Barba Velásquez Y R. F. Tituana Sánchez, “Diseño Y Construcción De Un Equipo Para La Transferencia De Calor Por La Conducción Para Los Materiales No Metálicos Para El Laboratorio De La Transferencia De Calor”, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2014.
- [5] W. G. Chóez Pincay, “Actualización De Los Equipos De Transferencia De Calor Por Conducción Y Convección Del Laboratorio De Termofluidos De La Fimep Mediante Un Sistema De Adquisición De Datos”, Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2002.

- [6] Busto Ricardo F. Y Ramírez Mendoza Ricardo A., *Sistemas De Control Moderno*, Vol. 2. México, 2014.
- [7] M. Elena Anaya Pérez, V. Hugo Benítez Baltazar, J. Horacio Pacheco Ramírez, F. Montaña Valle Investigación, M. Horacio Pacheco Ramírez, Y M. Félix Montaña Valle, “Diseño De Controladores P, Pi Y Pid Para El Comportamiento Dinámico De Un Servo-Sistema Hidráulico”, P. 21, jul. 2014.
- [8] Pérez Gómez Oscar Gabriel Y Esparza Laiton Sergio Andres, “Estudio E Implementación Del Uso De Plc Para Arranque De Motores Eléctricos”, Unidades Tecnológicas De Santander, Bucaramanga, 2019.
- [9] Siemens, “Lista De Precios Productos Industriales Eléctricos”, 2019, *Ecuador*.
- [10] Diana Del Rocio Casa Rojas Y Ana Marcela Regalado Alvarado, “Módulo Didáctico Para Control Electrónico De Potencia Deltriac”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007.
- [11] Instituto Tecnológico Superior De Misantla, “Imgeniantes”, Misantla, 2015.
- [12] C. Betancor, J. Cerezo, Y A. Vega, “Diseño De Un Sistema De Control De Temperatura”, *Departamento De Ingeniería Electrónica Y Automática*, Las Palmas.
- [13] N. F. V. Tapia Y Z. I. D. Aulestia, “Implementación De Un Sistema De Control De Los Parámetros Que Intervienen En Un Secador De Cacao Rectangular”, Universidad Técnica De Cotopaxi, Latacunga, 2022.
- [14] Jesús Bausà Aragonés, Carlos García Gómez, Benito Zaragozaí Zaragozaí, Alex Gil Martínez, Daniel Moreno Campos, Y Antonio Galiana Llinares, “Sensores De Temperatura”, 2003.
- [15] Siemens, “Manual De Logo Soft!”, 2003, *Alemania*.
- [16] B. Vargas, G. Marilyn, T. Ardila, Y H. Andrés, “Sistema Virtual 3d De Una Torre De Destilación, Mediante La Técnica De Hardware In The Loop, Para La Enseñanza En El Control De Procesos”, Latacunga, 2020.
- [17] Grupo Cym, “Ficha Técnica Anemómetro Digital”, 2020, *Ecuador*.

- [18] Bp Herramientas, “Ficha Técnica Termómetro Infrarrojo”, 2023, *Ecuador*.

# **8. ANEXOS**

**Anexo 1.** Diseño de la placa Pcb del circuito de fase



**Anexo 2.** Proceso de conexión

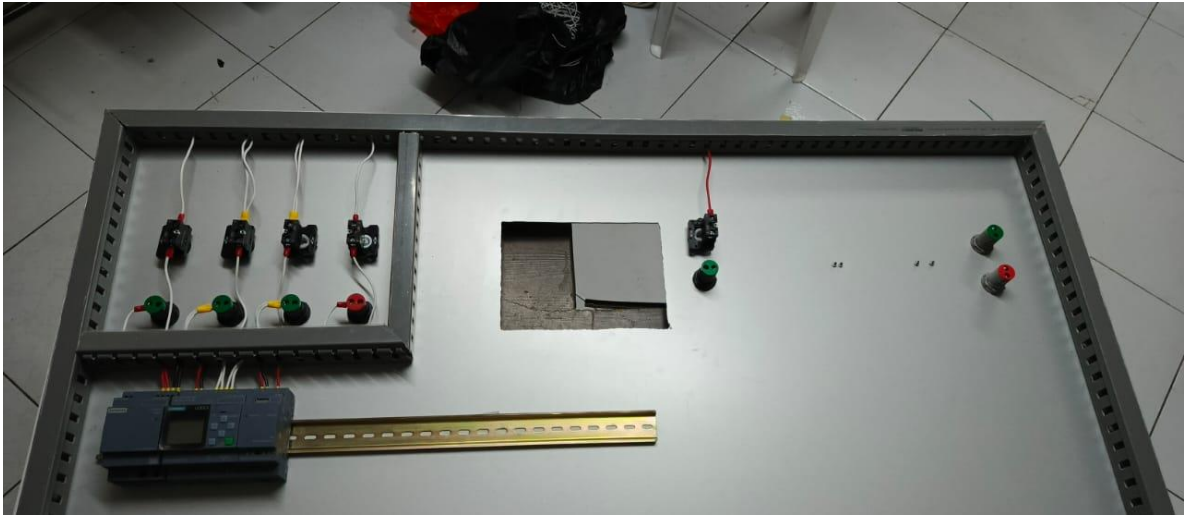
1) Prueba del diseño en el módulo



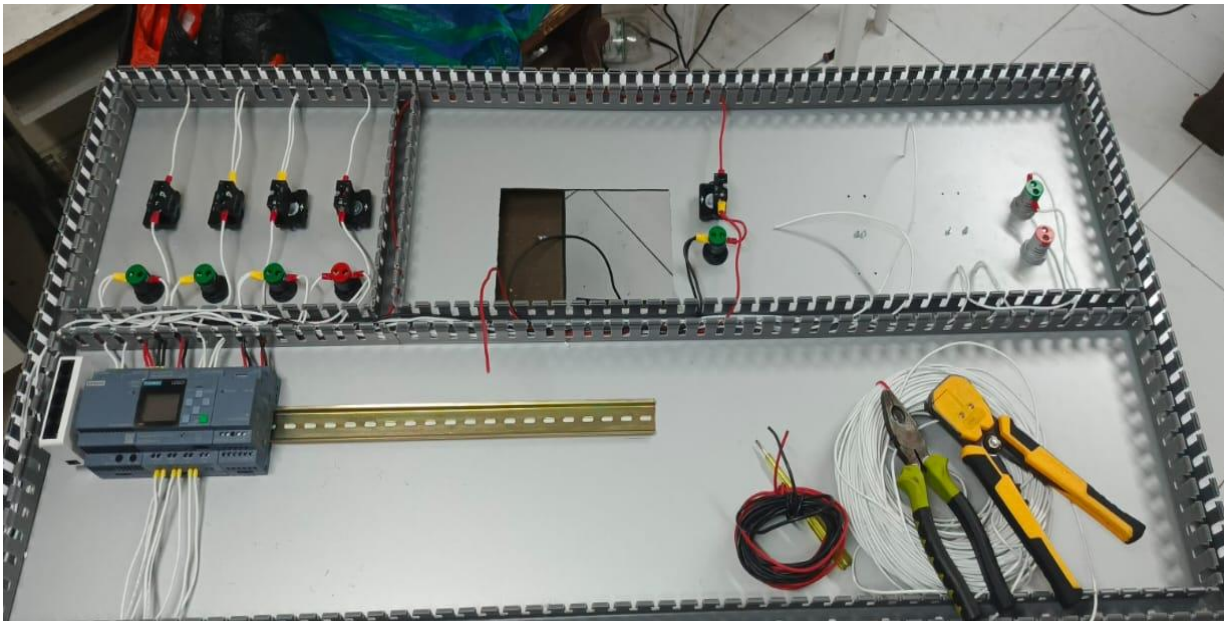
2) Montaje de los primeros equipos de control



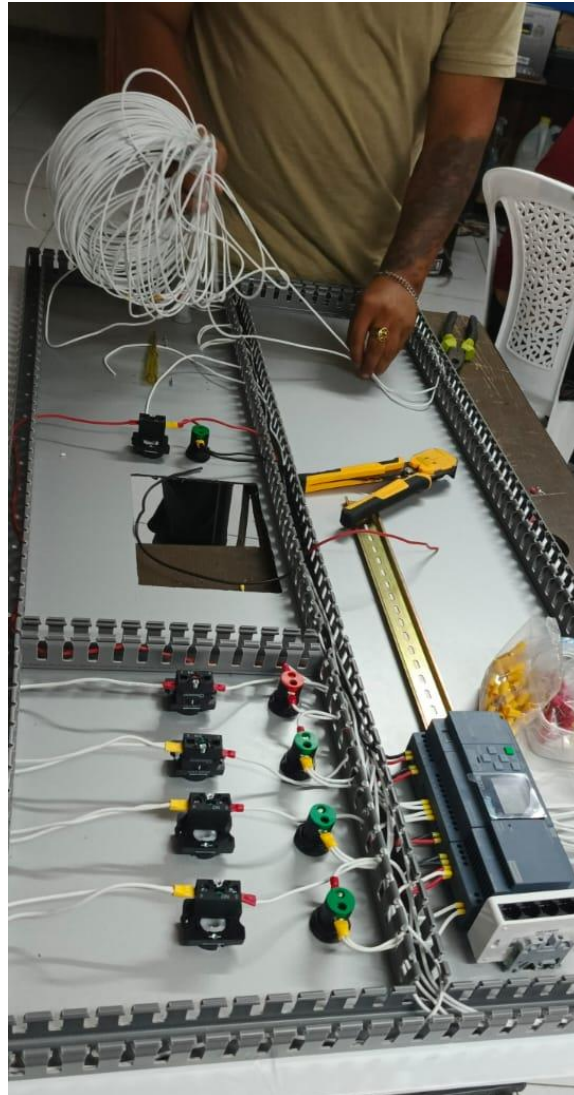
3) Montaje de logo, fuente y módulo de expansion



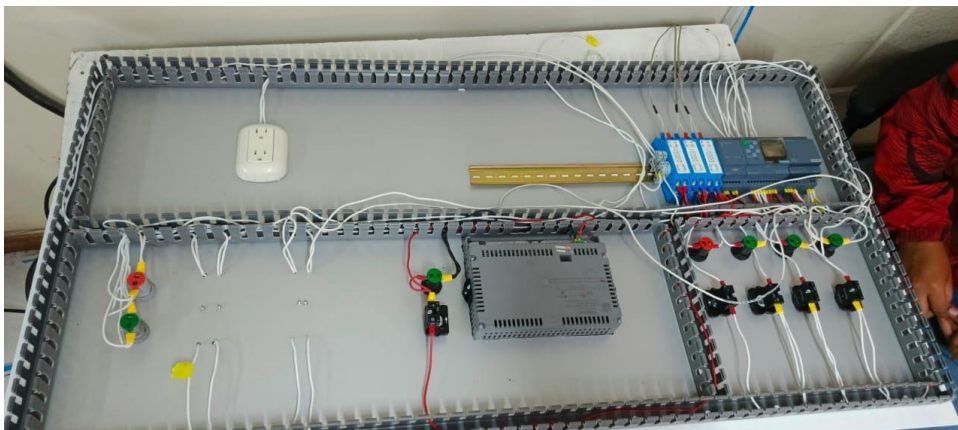
4) Colocación de canaletas



5) Cableado de todos los componentes



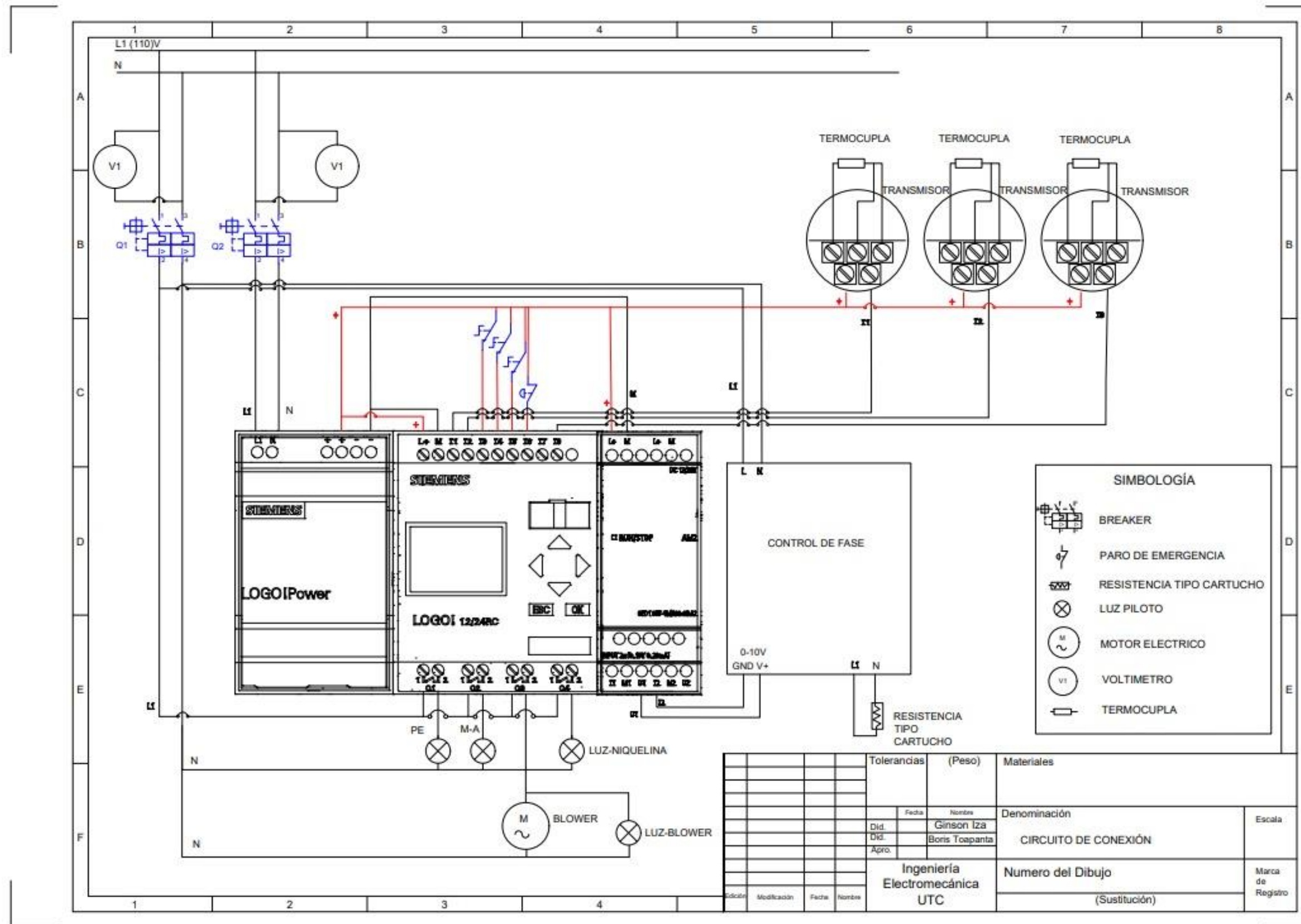
6) Cableado de transmisores



7) Pruebas de las conexiones

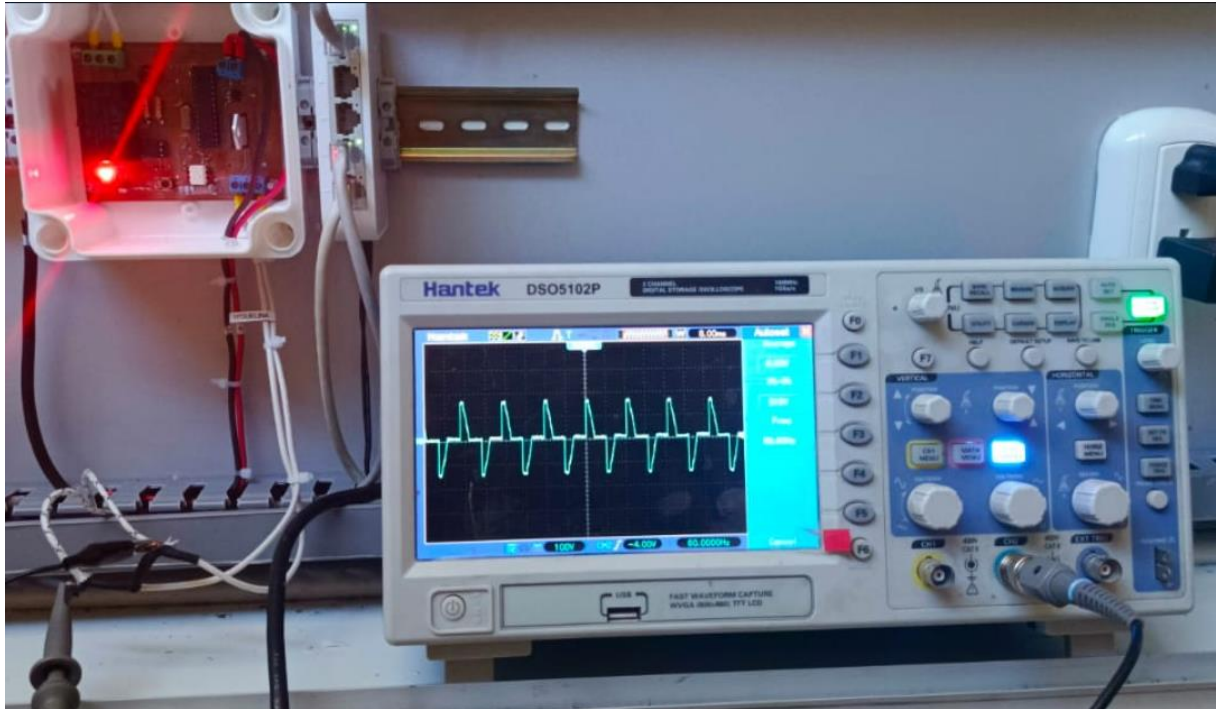


Anexo 3. Esquema De Conexió

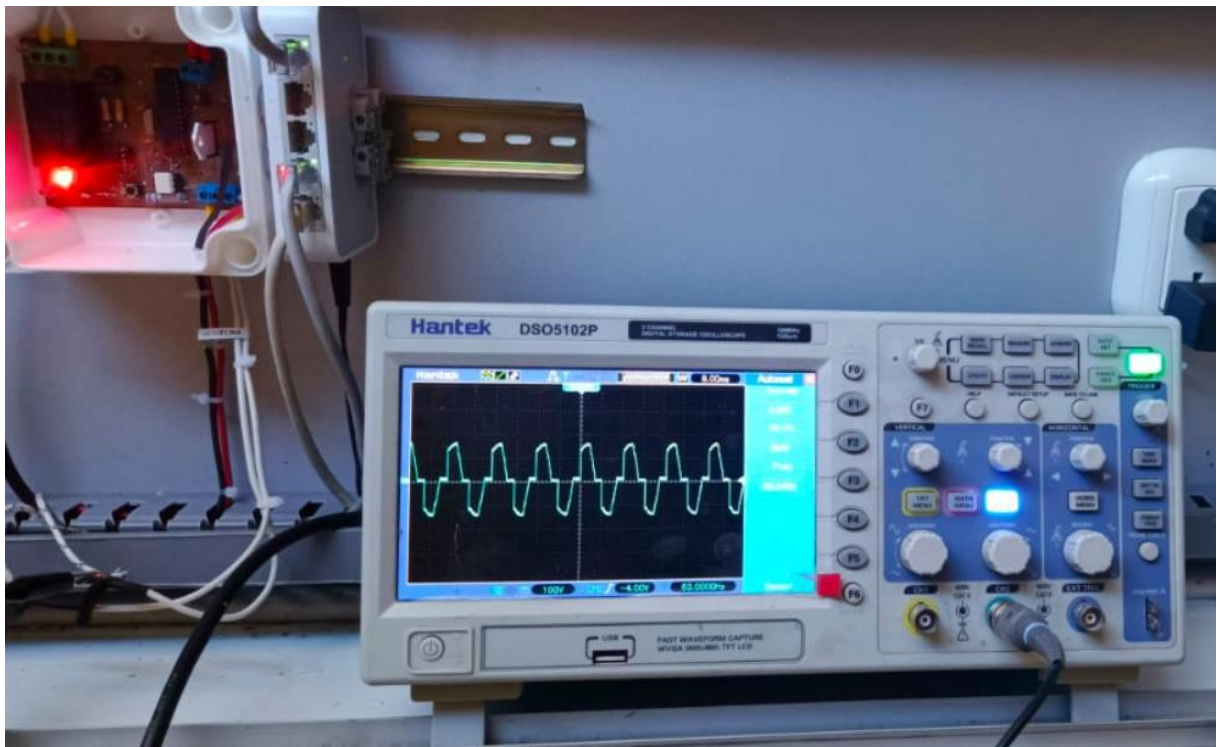


**Anexo 4.** Prueba De Control De Fase

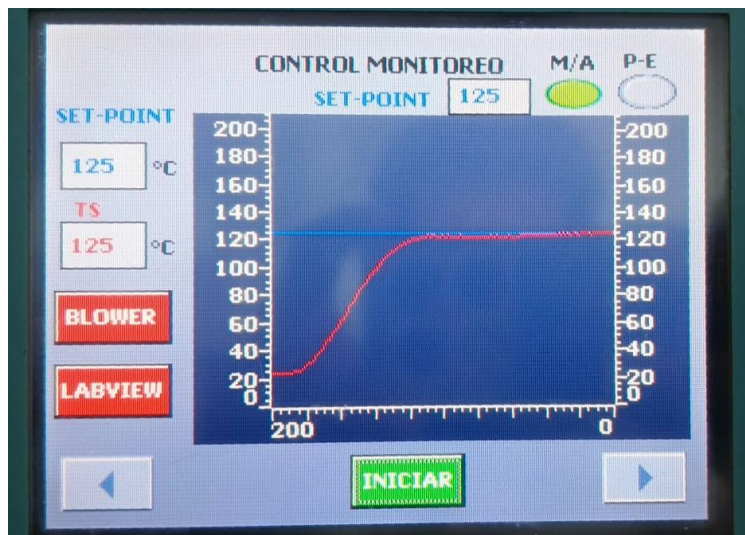
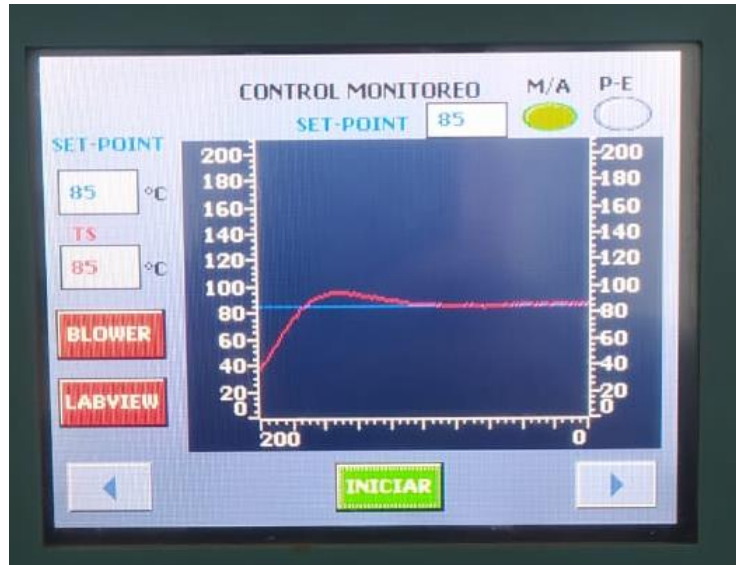
1) Ondas controladas en bajas temperaturas.



3) Ondas controladas en temperaturas altas



Anexo 5. Temperaturas Controladas



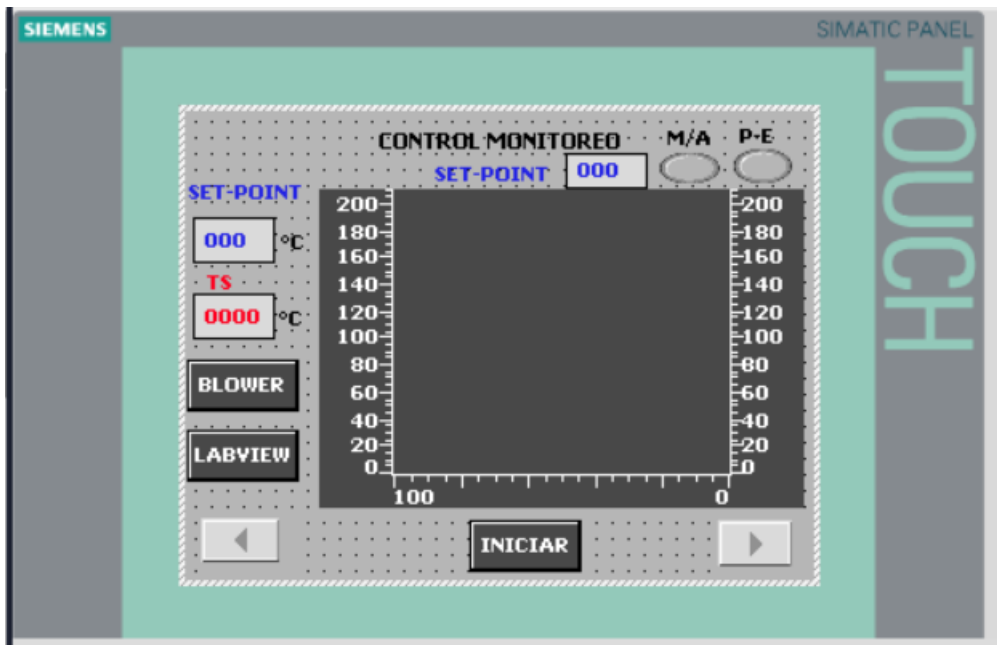


## Anexo 7. Pantallas De HMI

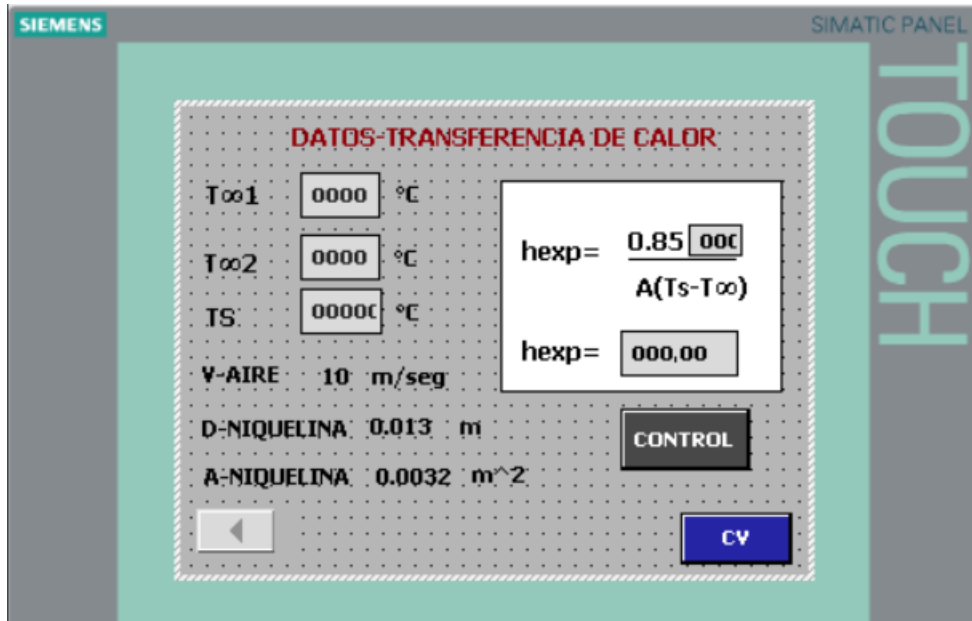
### 1) Pantalla principal



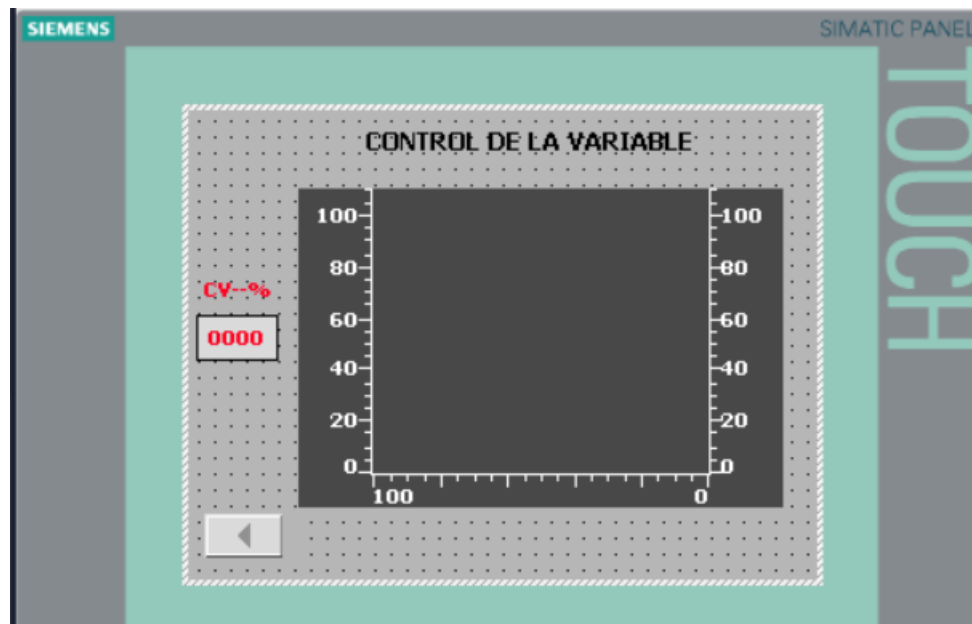
### 2) Pantalla de control



3) Pantalla de visualización de datos



4) Pantalla de visualización de %CV



**Anexo 8. Medición De Blower**



**Anexo 9. Demostración Práctica**





**Anexo10. Guía Práctica**

<b>LABORATORIO DE ELECTROTECNIA CARRERA DE INGENIERIA</b>
---

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR: Director de carrera:
Ginson Iza Boris Toapanta	Dr. Enrique Torres	MSc. Cristian Gallardo
Fecha:	Fecha:	Fecha:

CARRERA	CODIGO DE LA A SIGNATURA	NOMBRE DE LA A SIGNATURA
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA	IEM.T.05.2	TERMODINÁMICA

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	Área de transferencia de calor	DURACION (HORAS)
01	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Transferencia de calor por convección	2

1	OBJETIVO
<p>El objetivo es comprender y aplicar de manera práctica el proceso de transferencia de calor por convección mediante una práctica experimental, la cual se llevará a cabo siguiendo parámetros específicos para obtener el coeficiente de transferencia de calor de manera experimental; este valor se calculará utilizando las fórmulas de diferentes literarios para comparar resultados y evaluar el porcentaje de error entre ellos.</p>	

2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
<p><b>2.1. INTRODUCCIÓN</b></p> <p><b>DEFINICIÓN:</b></p> <p>La transferencia de calor por convección es un fenómeno fundamental en la ingeniería y las ciencias aplicadas, en el cual el calor se transfiere entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, como aire o agua. Este proceso es crucial en una amplia variedad de aplicaciones, desde el diseño de sistemas de calefacción, ventilación y refrigeración, hasta la optimización de intercambiadores de calor, procesos de secado, y la climatización de espacios habitables. Comprender este proceso no solo desde una perspectiva teórica, sino también a través de experiencias prácticas. A través de experimentos controlados, se puede observar la temperatura de la superficie, la temperatura ambiente. Garantizando así un rendimiento adecuado en una amplia gama de aplicaciones industriales y tecnológicas.</p>	

## 2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES

### NECESARIOS Equipos:

- Computadora (con los softwares necesarios)

### Materiales:

- Anemómetro
- Calculadora científica
- Cuaderno

## 2.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD

Los estudiantes y maestros solo necesitan asistir una vez a la primera entrevista de práctica introductoria de seguridad, que será facilitada por el personal del laboratorio y deben firmar el documento de referencia.

Es necesario el uso del Mandil adecuado

### Instrucciones de seguridad:

- Lea y comprenda la presente guía de laboratorio
- Lea y comprenda los manuales de uso de los equipos de laboratorio
- Absténgase de usar el teléfono celular durante la práctica
- No coma dentro del laboratorio
- No ingerir alimentos o bebidas dentro del laboratorio

## 2.4. TRABAJO PREPARATORIO

### CÁLCULOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se utiliza el siguiente procedimiento.

#### Coficiente de convección experimental.

El coeficiente de transferencia de calor por convección experimental se determina por la ecuación.

$$h_{\text{experimental}} = \frac{0,05 \cdot P}{A(T_s - T_{\infty 1})}$$

Donde:

P=potencia KW

A=área de la superficie  $m^2$

$T_{\infty 1}$ = temperatura del aire a la entrada del sistema, k

$T_s$ = temperatura de la superficie, k

Para el cálculo del área de la superficie se utilizó la ecuación.

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

Donde:

D=diámetro de la resistencia m

L= longitud de la resistencia m

**Coefficiente de convección teórico.**

El coeficiente de convección teórico se calcula utilizando el procedimiento establecido en la Incropera. Se buscan las propiedades a partir de la temperatura pelicular con la ecuación

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2}$$

Con el valor de la temperatura pelicular se establece las propiedades del fluido a partir de la Tabla. Con las propiedades se determina el valor del número de Reynolds para definir el tipo de régimen.

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
100	3.5582	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.788
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.688
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120.	0.709

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Donde:

V=velocidad de fluido m/s

D=diámetro de la resistencia m

$\nu$ =Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Con el valor de numero de Reynolds se determina el número de Nusselt utilizando las ecuaciones de Zukauskas, Churchill, Hilpert.

**Ecuación de Zukauskas**

En la ecuación las propiedades evaluadas en T= excepto Prs

Por lo tanto, de la Tabla. Pr<10, n=0.37

$Re_D$	<b>C</b>	<b>m</b>
0.4 - 4	0.989	0.330
4 - 40	0.911	0.385
40 - 4000	0.683	0.466
4000 - 40,000	0.193	0.618
40,000 - 400,000	0.027	0.805

$$Nu_D = C + (Re_D)^m + Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

**Ecuación de Churchill**

En la Ecuación con todas las propiedades evaluadas en Tfilm

$$Nu_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr} \right)^{1/4} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

**Ecuación de Hilpert**

En la ecuación con sus propiedades evaluada en Tfilm, y las constantes de la Tabla

Tabla. Constantes de la ecuación.

$Re_D$	C	m
1 - 40	0.75	0.4
40 - 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0.076	0.7

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$$

Con el número de Nusselt se determina el coeficiente de transferencia de calor por convección teórico.

$$h_{teórico} = Nu_D \cdot \frac{k}{D}$$

**Cálculo de error**

Para el cálculo de error entre el h experimental y el h teórico se utiliza la fórmula.

$$\%Error = \frac{|h_{exp} - h_{teórico}|}{h_{exp}} \cdot 100$$

**2.5. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA**

INCROPERA FRANK P. y DEWITT DAVID P., FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER, vol. 7. 2013.

## Anexo11. Manual de operación y mantenimiento

### MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

El Manual de Operación y Mantenimiento del módulo para prácticas de laboratorio sobre transferencia de calor por convección es una herramienta fundamental para garantizar la seguridad de los estudiantes al realizar las prácticas. Este documento se ha creado para orientar sobre su correcto uso y detallar el mantenimiento requerido para asegurar que el módulo funcione de manera continua.

#### Paso 1

Energizar el módulo.

#### Paso 2

Accionar breakers.



#### Paso 3

Encender la pantalla HMI-KTP-600.



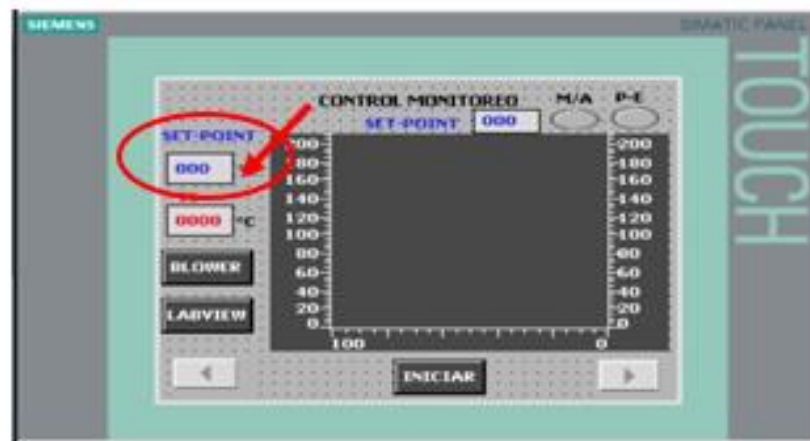
**Paso 4**

Una vez encendida la pantalla oprimimos control.



**Paso 5**

Digitar el set-point establecido por el docente.



**Paso 6**

Una vez digitado el SET-POINT oprimimos iniciar para que empiece el control PI



**Paso 7**

Una vez que la temperatura se estabilice encender el blower usando una de sus dos formas de activación.



**Paso 8**

Oprimimos la flecha derecha para pasar a la siguiente ventana.



**Paso 9**

En esta ventana se observa la tabla de temperaturas y potencias, encoge la potencia de la temperatura seteada.

DATOS POTENCIA					
TEMP. °C	P. W	TEMP. °C	P. W	TEMP. °C	P. W
80 °C	24 W	125 °C	42 W	170 °C	60 W
85 °C	26 W	130 °C	44 W	175 °C	62 W
90 °C	28 W	135 °C	46 W	180 °C	64 W
95 °C	30 W	140 °C	48 W	185 °C	66 W
100 °C	32 W	145 °C	50 W	190 °C	68 W
105 °C	34 W	150 °C	52 W	195 °C	70 W
110 °C	36 W	155 °C	54 W	200 °C	72 W
115 °C	38 W	160 °C	56 W		
120 °C	40 W	165 °C	58 W		

**Paso 10**

Oprimimos la flecha derecha para pasar a la siguiente ventana.

DATOS POTENCIA					
TEMP. °C	P. W	TEMP. °C	P. W	TEMP. °C	P. W
80 °C	24 W	125 °C	42 W	170 °C	60 W
85 °C	26 W	130 °C	44 W	175 °C	62 W
90 °C	28 W	135 °C	46 W	180 °C	64 W
95 °C	30 W	140 °C	48 W	185 °C	66 W
100 °C	32 W	145 °C	50 W	190 °C	68 W
105 °C	34 W	150 °C	52 W	195 °C	70 W
110 °C	36 W	155 °C	54 W	200 °C	72 W
115 °C	38 W	160 °C	56 W		
120 °C	40 W	165 °C	58 W		

**Paso 11**

En esta ventana en la fórmula de la h experimental digitamos la potencia de la temperatura según la tabla, y procedemos a la recolección de todos los datos.



**Paso 12**

Oprimir control



**Paso 13**

Una vez oprimido nos regresamos a la ventana de control apagamos el blower de la misma manera como se encendió.





**Paso 14**  
Apagamos el control PI.



**Paso 15**

- Apagar la pantalla
- Desactivar los breakers
- Desenergizar el módulo

### Mantenimiento

- Desconectar la energía del módulo.
- Llevar a cabo una limpieza del módulo para retirar partículas ambientales acumuladas, con una frecuencia trimestral.
- Revisar los cables en busca de signos de recalentamiento y reemplazar aquellos que estén deteriorados.
- Remover las puntas de cables recalentadas para asegurar conexiones seguras.
- Ajustar las conexiones para garantizar una continuidad eléctrica óptima.
- Identificar y reemplazar componentes dañados en el sistema.
- Verificar y calibrar los instrumentos de medición para mantener la precisión.
- Realizar una limpieza cuidadosa de la pantalla utilizando materiales antiestáticos una vez al mes, para evitar daños.
- Cambio de la resistencia tipo cartucho una vez al año.
- Finalmente, y de gran importancia, se debe llevar a cabo una prueba de funcionamiento y medir voltaje y corriente.