UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Control de variables críticas de un transformador de calor por absorción

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:
JORGE CARBAJAL CARBAJAL

DIRECTORES:
DIRECTOR: DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ
CODIRECTOR: DR. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

CUERNAVACA, NOVIEMBRE 2026

Agradecimientos

Un agradecimiento a Dios por darme la oportunidad de pasar por esta etapa de mi vida, que me ayudó a poner a prueba mis habilidades, conocer nuevas personas e incluso mantener amistades de antes. Agradezco todos los conocimientos adquiridos y toda la aventura que representó este proyecto de investigación.

Un agradecimiento a mis padres Elvira Carbajal Carbajal y José Pablo Carbajal Flores por siempre apoyarme y estar conmigo en cada proceso, por sus consejos, por su amor y por darme la oportunidad de superarme.

Agradezco a mi asesor el Dr. Armando Huicochea Rodríguez por todo su seguimiento, su paciencia, sus enseñanzas y sus consejos, que inclusive fueron más allá del proyecto, agradezco en enseñarme a siempre buscar una solución en cada uno de los retos y siempre ver las cosas con positivismo.

Un agradecimiento a mi asesor el Dr. Jorge Arturo Sandoval Espino por estar siempre presente en cualquier problema técnico por su apoyo, sus consejos y su ayuda, además de ser una guía muy importante para la parte electrónica y de control.

Un agradecimiento a todo mi comité tutoral por su retroalimentación en cada momento y darme las retroalimentaciones para la mejora de este trabajo.
Un agradecimiento al Dr. Tabai Torres Díaz porque mucho de este trabajo fue gracias a su apoyo y acompañamiento académico.

Dedicatoria

Dedico este logro hasta el cielo a mi abuelita Angelina Carbajal, quien fue un pilar fundamental en mi infancia y siempre me motivó a estudiar, recordándome que era lo mejor para mi futuro. Guardo todas sus enseñanzas y consejos en mi corazón. Este logro también es para ella, con todo mi amor.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se desarrolló e implementó un sistema de control para un Transformador de Calor por Absorción (TCA) de 2 kW, el cual anteriormente era operado de manera manual. El monitoreo de las variables del sistema se realizaba mediante un adquisidor de datos, mientras que el operador inspeccionaba visualmente y ajustaba parámetros como temperatura, flujo y presión. Asimismo, las fuentes utilizadas para simular el calor residual del TCA eran controladas manualmente mediante un variador de frecuencia.

Como parte del proyecto, se desarrolló una interfaz gráfica en LabVIEW, para el monitoreo de las principales variables de operación del TCA, incluyendo temperatura, flujo y presión. De igual manera, se implementó un sistema de control basado en un Controlador Lógico Programable (PLC), encargado de gestionar el funcionamiento de los motores y componentes eléctricos del equipo.

Adicionalmente, se implementó un sistema de control proporcional integral-derivativo (PID) en las fuentes del calor de desecho para activar el TCA (generador/evaporador), para mantener las temperaturas deseadas. Las bombas de desplazamiento positivo encargadas de suministrar las soluciones de trabajo para el generador y absorbedor, también, fueron integradas al sistema de control y vinculadas con la interfaz gráfica. Este sistema permite registrar los posicionamientos de las bombas de solución, proporcionando un control útil para desarrollar el ciclo termodinámico, y así analizar su funcionamiento.

Los resultados obtenidos muestran que la implementación del sistema de control permitió mejorar la regulación de las fuentes de calentamiento, logrando alcanzar y mantener de manera más eficiente las temperaturas requeridas. Asimismo, la interfaz gráfica proporciona información en tiempo real sobre las variables y el estado del sistema de control, facilitando la supervisión y operación del equipo. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la incorporación del sistema de control y monitoreo representa una mejora respecto al esquema de operación manual utilizado anteriormente. Además, el sistema desarrollado constituye una base para continuar con el proceso de automatización y optimización del TCA de 2 kW, así como para futuras investigaciones relacionadas con su control y operación.

ABSTRACT

In this thesis, a control system was developed and implemented for a 2 kW Absorption Heat Transformer (AHT), which was previously operated manually. The system variables were monitored using a data acquisition system, while the operator visually inspected and adjusted parameters such as temperature, flow rate, and pressure. Likewise, the heat sources used to simulate the waste heat of the AHT were manually controlled using a variable frequency drive.

As part of the project, a graphical interface was developed in LabVIEW to monitor the main operating variables of the AHT, including temperature, flow rate, and pressure. Additionally, a control system based on a Programmable Logic Controller (PLC) was implemented to manage the operation of the equipment's motors and electrical components.

Furthermore, a Proportional-Integral-Derivative (PID) control system was implemented in the heat sources used to simulate waste heat for the AHT (generator/evaporator) to maintain the desired temperatures. The positive displacement pumps responsible for supplying the working solutions to the generator and absorber were also integrated into the control system and connected to the graphical interface. This system allows the positions of the solution pumps to be recorded, providing useful information for developing the thermodynamic cycle and analyzing its operation.

The results show that the implementation of the control system improved the regulation of the heating sources, allowing the required temperatures to be reached and maintained more efficiently. Likewise, the graphical interface provides real-time information on the system variables and control status, facilitating equipment monitoring and operation. Overall, the results demonstrate that incorporating the control and monitoring system represents an improvement over the previous manual operating scheme. Furthermore, the developed system provides a foundation for further automation and optimization of the 2 kW AHT, as well as for future research related to its control and operation.

INDICE

LISTA DE FIGURAS 1
LISTA DE TABLAS 2
FIGURAS EN APÉNDICES 2
NOMENCLATURA 3
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 5
1.1 Transformador de calor por absorción 6
1.1.1 Descripción del ciclo termodinámico del TCA 6
1.2 Controlador lógico programable 7
1.3 Justificación 9
1.4 Objetivo general 9
1.5 Objetivos específicos 9
1.6 Alcance 9
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE 10
2.1 Aplicaciones industriales de los TCA 11
2.2 Métodos de control tradicionales en TCA 12
2.3 Automatización de procesos térmicos con PLC 14
2.4 Antecedentes 14
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL 15
3.1 Componentes del TCA 16
3.2 Dispositivos de control 21
3.3 Sensores de variables críticas 22
CAPÍTULO IV. FUNDAMENTO TEÓRICO 25
4.1. Automatización de procesos industriales y térmicos 26
4.1.1 Ventajas y retos 26
4.2 Tecnologías disponibles para control automático 27
4.3 LabVIEW 27
4.3.1 Características de LabVIEW 28
4.3.2 Implementación en entornos industriales 28
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA 30
5.1 Diseño del sistema de monitoreo y control 31
5.1.1 Descripción y armado de la propuesta de control para una MB 34
5.2 Desarrollo de la interfaz gráfica en LabVIEW 38
5.3 Implementación del control automático 42
5.4 Mantenimiento del TCA 43
5.5 Validación y pruebas experimentales del PLC y sistema de control 45
CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES 47
6.1 Resultados 48
6.2 Resultados del sistema de control implementado 53
6.3 Flujos másicos 56
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57
7.1 Conclusiones 58
7.2 Recomendaciones 59
ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 60
ANEXO B. DIAGRAMAS DE CONTROL 71
PRODUCCIÓN ACADÉMICA 74
REFERENCIAS 78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático del TCA básico 6
Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema de control PLC 8
Figura 3. Diagrama esquemático del TCA experimental 17
Figura 4. Coraza generador-condensador 18
Figura 5. Coraza evaporador- absorbedor 19
Figura 6. Parte interna de coraza evaporador-absorbedor 20
Figura 7. TCA experimental 20
Figura 8. PLC experimental 21
Figura 9. Tablero de control 22
Figura 10. Calibración de transductores 23
Figura 11. Instrumentación del TCA experimental 24
Figura 12. VI LabVIEW 28
Figura 13. Siglas de las variables 32
Figura 14. Bloque de datos Modbus TCP 32
Figura 15. Programación de escalera 33
Figura 16. Bloques de lectura de sensores de temperatura 33
Figura 17. Sistema de control completo 34
Figura 18. Tarjeta de control de la microbomba motorizada 36
Figura 19. Circuito potenciómetro 36
Figura 20. Base de motor y potenciómetro 37
Figura 21. Soporte para las tres bases 37
Figura 22. Integración microbombas en la interfaz 38
Figura 23. Programación Modbus TCP 39
Figura 24. Parte de calentamiento de las fuentes 40
Figura 25. Guardar datos en Excel 40
Figura 26. Librería Modbus TCP 41
Figura 27. Programación del bloque PID 43
Figura 28. Mantenimiento al TCA 44
Figura 29. Mantenimiento a la torre de enfriamiento 44
Figura 30. Temperatura estable 45
Figura 31. Control de la fuente de calentamiento del Generador 48
Figura 32. Pruebas de la fuente de calentamiento del generador en el 2025 49
Figura 33. Control de la fuente de calentamiento del evaporador 50
Figura 34. Control de la fuente de calentamiento del evaporador 51
Figura 35. Comportamiento térmico del TCA 51
Figura 36. Comportamiento térmico del TCA 52
Figura 37. Fuentes de calentamiento con control manual 53
Figura 38. Interfaz gráfica (Visualización de variables) 54
Figura 39. Interfaz gráfica (Visualización de temperaturas) 55
Figura 40. Interfaz gráfica (Visualización de presiones) 55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la calibración de los transductores de presión.....23
Tabla 2. Condiciones de operación y respuesta térmica del TCA.....50
Tabla 3. Comparación de los resultados para el control manual y el control PID.....52

FIGURAS EN APÉNDICES

Figura A1. Adquisidor de datos AGILENT 60
Figura A2. Bomba de vacío 60
Figura A3. Bomba presurizadora B4 61
Figura A4. Bomba presurizadora B5 61
Figura A5. Flujómetro analógico 61
Figura A6. Flujómetro digital B2800 62
Figura A7. Flujómetro digital McMillan 62
Figura A8. Manovacuómetro 63
Figura A9. Fuente de alimentación 63
Figura A10. Microbomba 63
Figura A11. Resistencias eléctricas de inmersión 64
Figura A12. Termopar tipo T 64
Figura A13. Torre de enfriamiento 665
Figura A14. Transductor de presión 65
Figura A15. PLC S7-1500 66
Figura A16. Módulo de entradas digitales 66
Figura A17. Módulo de salidas digitales 67
Figura A18. Módulo de entradas analógicas 67
Figura A19. Módulo de salidas analógicas 67
Figura A20. Relevador monofásico de estado sólido 68
Figura A21. Relevador trifásico de estado sólido 68
Figura A22. Potenciómetro 69
Figura A23. Motor a pasos 5V 69
Figura A24. Arduino Nano 69
Figura A25. LCD 16 segmentos 70
Figura B1. Circuito electrónico potenciómetro motorizado 71
Figura B2. Diagrama eléctrico bombas 72
Figura B3. Diagrama eléctrico de resistencias de inmersión 73

NOMENCLATURA

B	Bomba	LPM
C□	Calor específico	kJ/kg °C
COP	Coeficiente de rendimiento	adimensional
EVAB	Evaporador/Absorbedor	—
F	Flujómetro	LPM
GECO	Generador/Condensador	—
I	Corriente eléctrica	A
IC	Intercambiador de calor	—
L	Longitud	m
ṁ	Flujo másico	kg/s
MB	Microbomba	LPM
P	Presión	kPa
PLC	Controlador lógico programable	—
PT	Sensores de temperatura (termo-resistivos)	°C
$\dot{Q}$	Flujo de calor	kW
SC	Solución concentrada	% LiBr
SCADA	Sistema de adquisición de datos	—
SD	Solución diluida	% LiBr
T	Temperatura	°C
TCA	Transformador de calor por absorción	kW

Subíndice

ABS	Absorbedor
AC	Agua condensada
AE	Agua de enfriamiento
CON	Condensador
ECON	Economizador
EVA	Evaporador
GEN	Generador

Estructura de la tesis

El desarrollo de este proyecto está integrado por 7 capítulos y 2 anexos que reflejan todas las actividades desarrolladas para lograr este proyecto:

El **Capítulo I** da una breve introducción sobre el transformador de calor por absorción y la importancia de su automatización para control de variables críticas. También, se aborda la justificación, el objetivo principal, los objetivos específicos y el alcance de este proyecto.

En el **Capítulo II** se presenta una revisión del estado del arte sobre estudios reportados en literatura de aplicaciones industriales y control de los transformadores de calor por absorción, además se identifican sus principales áreas de oportunidad.

El **Capítulo III** aborda la descripción de los componentes del transformador de calor por absorción de 2 kW utilizado para este proyecto, incluyendo los componentes electrónicos, sensores y actuadores que conforman el sistema para tener un panorama de cada componente.

En el **Capítulo IV** se expone el fundamento teórico de la automatización en procesos térmicos, destacando sus ventajas, retos y tecnologías disponibles, destacando el uso del PLC. También se detallan las características del software LabVIEW incluyendo ejemplos sobre sistemas implementados en sistemas térmicos industriales.

El **Capítulo V** presenta la metodología desarrollada para el diseño e implementación del sistema de monitoreo y control. Incluye la selección, el diseño de diagramas y la arquitectura del sistema, el desarrollo de la interfaz gráfica en LabVIEW y la programación de control en TIA Portal. Finalmente se describen las pruebas iniciales y los protocolos de validación para evaluar el desempeño del sistema.

En el **Capítulo VI** se muestran los resultados obtenidos y se discuten. Los resultados incluyen el desempeño del sistema de control, los valores experimentales de las variables críticas descritos en gráficas y las comparaciones con estudios previos realizados con el equipo experimental.

El **Capítulo VII** detalla las conclusiones en base a los resultados y los objetivos de este trabajo, enfatizando en su contribución en el campo de los transformadores de calor por absorción y poniendo recomendaciones para futuros desarrollos y mejoras en este tipo de sistemas de control.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Se da una breve introducción en este **Capítulo I** sobre qué es un transformador de calor por absorción, explicando su funcionamiento para resaltar la importancia de este como un dispositivo capaz de revalorizar la energía térmica de desecho, contribuyendo a una mayor eficiencia energética. Se mencionan las principales dificultades asociadas con el control y monitoreo de sus variables críticas, enfatizando en la necesidad de soluciones que mejoren su operación. En este contexto se presenta al controlador lógico programable como una herramienta clave para automatizar algunos de sus procesos de manera precisa. Además de dar a conocer el objetivo principal, objetivos específicos, justificación y alcance de esta investigación.

1.1 Transformador de calor por absorción

La utilización de la energía a gran escala se ha convertido en una preocupación vital debido al aumento de la demanda de uso de energía en las últimas décadas (Helvacı y Khan, 2016), por ello hoy en día se requieren nuevas alternativas para obtener fuentes de energía limpias y renovables que nos ayuden a disminuir el consumo de energías provenientes de combustibles fósiles. Una alternativa para asegurar el abastecimiento de energías a las futuras generaciones es buscar nuevas alternativas de fuentes de energía como los transformadores de calor por absorción (Wang et al., 2017). Un Transformador de Calor por Absorción (TCA) es un equipo térmico que revaloriza una parte de calor proveniente de una fuente térmica. Por lo cual resulta atractivo, ya que puede alimentarse de una fuente de desecho industrial o de energía renovable (energía solar o geotérmica). El calor revalorizado puede implementarse en un proceso para tener un beneficio primario o secundario según la fuente de calor. Los TCA no son dispositivos ampliamente estudiados a diferencia de los sistemas de refrigeración por absorción, por ello es importante seguir investigando para obtener avances orientados a maximizar la eficiencia energética y exergética, control de los procesos, reducir su tamaño, factibilidad económica, entre otros.

1.1.1 Descripción del ciclo termodinámico del TCA

Un transformador de calor por absorción está constituido por un ciclo termodinámico para aprovechar el calor residual y transformarlo en calor a una temperatura mayor. Están conformados por cuatro intercambiadores de calor. En la **Figura 1** se muestran los cuatro intercambiadores de calor principales del TCA en una gráfica de temperatura contra presión.

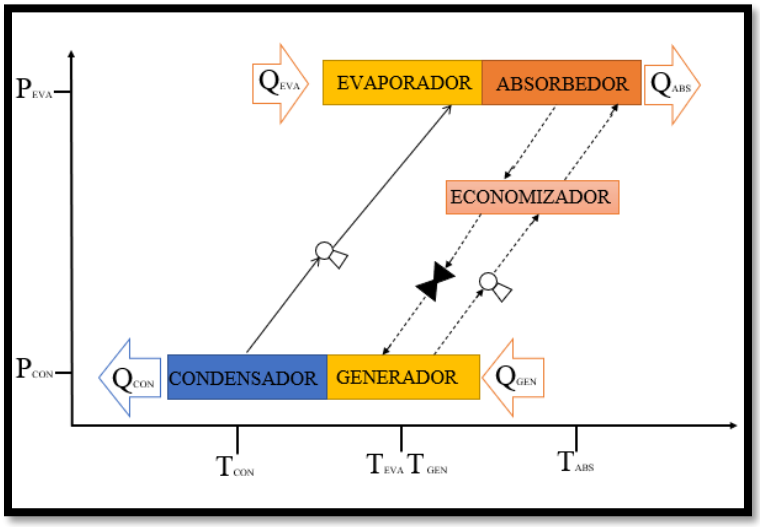


***Figura 1**. Diagrama esquemático del TCA básico*

Inicialmente, el Generador recibe una cantidad de calor residual (Q_{GEN}) a una temperatura intermedia, que es utilizada para vaporizar el refrigerante de una solución débil, es decir con baja concentración de absorbente. Posteriormente el refrigerante en fase vapor va al Condensador para liberar el calor a baja temperatura (Q_{CON}) y tener el refrigerante en fase líquida. Este líquido es mandado al evaporador mediante una bomba,

donde con ayuda del calor residual a temperatura media (Q_{EVA}), se evapora nuevamente. Posteriormente, en el absorbedor (AB), el vapor de refrigerante es absorbido por una solución de alta concentración de absorbente, generando una reacción exotérmica que nos dará el calor útil (Q_{ABS}) (Rivera et al., 2015).

1.2 Controlador lógico programable

El Controlador Lógico Programable (PLC) es una computadora industrial utilizada en la industria para automatizar procesos. Con el apoyo de una memoria programable se guardan instrucciones que le permitan realizar funciones de lógica, secuenciación, temporización, conteo y aritmética. Los PLC son usados para tomar control de máquinas y procesos en la industria, haciendo a un lado una gran parte del cableado asociado que hay en los circuitos de control de relés convencionales. Los PLC sobresalen por su sencillez de programación e instalación, rapidez de control, compatibilidad con redes, confiabilidad y la capacidad que tienen por su velocidad de respuesta (Petruzella, 2017). Están hechos para maniobrar múltiples arreglos de entradas y salidas, operar en condiciones duras como rangos de temperatura extendidos, poder resistir el ruido eléctrico, vibraciones y golpes. Estas características hacen que el controlador lógico programable sea ideal para trabajar en la industria de manera automatizada. Una característica importante de los PLC es que están diseñados de manera que ingenieros con conocimiento limitado en computación y lenguaje informático, puedan emplear este sistema. Por lo que, los fabricantes han reprogramado el PLC con lenguajes más simples e intuitivos que facilitan la configuración o el cambio de programas de control sin la exigencia de tener las habilidades avanzadas en programación. Así mismo, como un sistema que trabaja en tiempo real, el estado de las salidas del PLC depende de las señales de entrada y de la lógica de control programada, lo que lo hace en un dispositivo fundamental y robusto para la automatización industrial. Según Petruzella (2017) un PLC está compuesto por diferentes módulos que trabajan en conjunto para ejecutar tareas de control. Entre sus componentes más importantes se encuentran:

1. Unidad central de procesamiento (CPU): Es el "cerebro" del PLC, que tiene el microprocesador que se encarga de analizar las señales de entrada y verificar las acciones de control apoyándose en el programa que hay en su memoria. El procesador informa de las decisiones como señales de acción a las salidas. Aparte, el CPU tiene todo el control de la actividad del PLC, dejando al usuario incluir programas por medio de lógica de escalera de relés, uno de los lenguajes de programación más conocidos que hay. La función del PLC sigue un procedimiento que se repite llamado "escaneo", que empieza con el reconocimiento de las entradas, seguido de la ejecución del programa, actualización de las salidas y diagnóstico interno. Este ciclo se mantiene en repetición mientras el PLC esté en modo de ejecución.

2. Fuente de alimentación: Convierte el voltaje de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC) baja, encargada de suministrar corriente al procesador y los circuitos de módulos de interfaz de entrada y salida. En sistemas grandes de PLC, la fuente de alimentación no distribuye la energía de manera directa a los dispositivos de campo que hay, ya que estos tienen la posibilidad de alimentarse por medio de otras fuentes externas de corriente alterna (CA) o corriente continua (CC). En cambio, en los sistemas pequeños

de PLC, la fuente puede alimentar al controlador como a los dispositivos de campo sin necesidad de fuentes externas.

3. Dispositivo de programación: Utilizado para desarrollar y transferir el programa que requiera el PLC. Este programa se guarda en la memoria que tiene el procesador y lleva consigo las instrucciones necesarias para hacer las acciones de control. La lógica de escalera de relés, un lenguaje visual que maneja símbolos gráficos, es frecuentemente más utilizada para esta finalidad.

4. Unidad de memoria: Guarda el programa del usuario, los datos de entrada para procesamiento y los datos de salida. Esta memoria es fundamental para que las acciones de control previstas se puedan ejecutar por el microprocesador.

5. Secciones de entrada y salida (E/S): Estas secciones hacen la interfaz entre el controlador y los dispositivos de campo que hay. Los dispositivos de entrada, como interruptores, sensores de temperatura, células fotoeléctricas o sensores de flujo, mandan información hacia el procesador, mientras que las salidas, como bobinas de arranque de motor o válvulas de solenoide, toman las señales de acción desde el procesador. Los dispositivos E/S pueden utilizar las señales digitales, discretas o analógicas, dependiendo de los requerimientos del sistema le pida.

6. Interfaz de comunicaciones: Recibe y transmite datos en las redes de comunicación que haya, conectándose con demás PLC remotos o sistemas. Esta interfaz administra tareas como la verificación de dispositivos, adquisición de datos, sincronización entre aplicaciones y la gestión de conexiones. Todos estos componentes trabajan de manera colectiva para cumplir con las tareas del acondicionamiento de señales, procesamiento de datos y ejecución de acciones de control dentro del sistema, incluyendo a los dispositivos del mundo real, como a los de programa lógico interno del PLC. En la **Figura 2** se representan las partes del PLC.

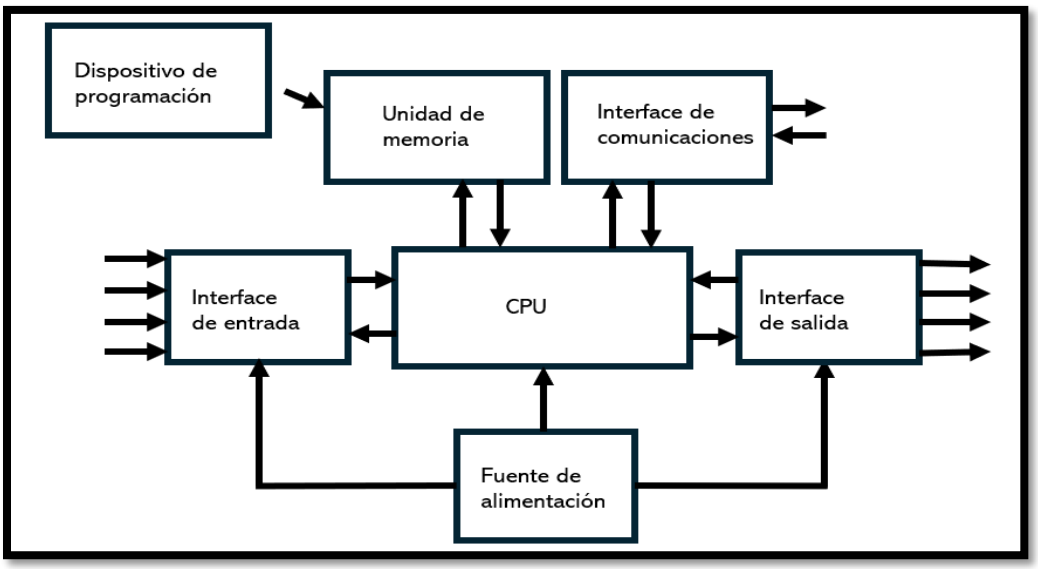


Figura 2. *Diagrama de bloques de un sistema de control PLC*

1.3 Justificación

El uso de transformadores de calor en la industria continúa siendo limitada en comparación con otras tecnologías térmicas debido a que es una tecnología que aún sigue en proceso de investigación, a pesar de ello, tiene mucho potencial en futuras aplicaciones ya que utiliza energía térmica de desecho y la revaloriza, convirtiendo esta energía térmica útil para otro proceso, lo cual ayuda a reciclar energía de desecho de las industrias. Con esto se obtienen beneficios tanto de ahorro energético para las industrias como un beneficio al medio ambiente, en el Laboratorio de Energía Térmica Aplicada (LITA) en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) se realiza el estudio de estas máquinas las cuales se encuentran en proceso de investigación. Para trabajar con este tipo de máquinas, es importante saber que cuentan con varios tipos de sensores y actuadores que se tienen que monitorear, por esto, se vuelve un sistema complejo de manejar. En este proyecto se plantea implementar el uso de un controlador lógico programable en un transformador de calor por absorción que nos ayude a realizar un monitoreo más práctico en una interfaz gráfica de LabVIEW, así como obtener un mejor control de esta máquina para mejorar la eficiencia de futuras investigaciones de este transformador.

1.4 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema para el monitoreo y control de las variables críticas de un transformador de calor por absorción utilizando un controlador lógico programable

1.5 Objetivos específicos

- ✓ Programar un PLC S7-1500 con el software TIA portal para controlar las variables de temperatura, presión y flujo másico en el transformador de calor por absorción utilizando el lenguaje Ladder
- ✓ Desarrollar una interfaz gráfica para el monitoreo de todas las variables del sistema
- ✓ Evaluar la operación del transformador de calor por absorción mediante el controlador y la interfaz gráfica

1.6 Alcance

Al término del proyecto se tendrá el transformador de calor por absorción de 2 kW automatizado parcialmente por un autómata desde una interfaz que nos permita hacer el monitoreo de sensores y actuadores del sistema, la cual reducirá el tiempo de las pruebas experimentales y mejorará la operación y control del TCA.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

En este **Capítulo II** se presenta una revisión del estado del arte de los TCA, enfocándose en estudios previos sobre los tipos de control utilizados en transformadores y bombas de calor por absorción, además de identificar sus principales áreas de oportunidad y los métodos de control empleados. También se realizó una revisión de los PLC utilizados en estos equipos, con el fin de relacionar los beneficios que ofrecen y las principales dificultades presentes en estos sistemas, siendo una de ellas la automatización, por lo que este tema se incluye dentro del estado del arte.

2.1 Aplicaciones industriales de los TCA

En los últimos años, el uso de transformadores de calor por absorción (TCA) ha tenido un avance significativo. Los TCA tienen un gran potencial en la utilización y mejora de fuentes de calor de bajo nivel. Otros beneficios de los ciclos de absorción incluyen un consumo significativamente menor de electricidad, una posible reducción en las emisiones de CO_2, la no destrucción de la capa de ozono y el uso de refrigerantes naturales, lo que aumenta el atractivo de estos sistemas. El uso de transformadores de calor por absorción se ha vuelto aún más popular a medida que el costo de los combustibles fósiles sigue aumentando (Parham et al., 2014), además de todos los beneficios en consumo de energía puede ser utilizado con alguna fuente que provenga de la energía solar para la desalinización del agua de mar lo cual da solución a múltiples problemas tanto en recursos energéticos como en el tema del agua, por ello son dispositivos de suma importancia en la investigación (Gomri, 2010). El uso de calor residual o de fuentes de calor de baja exergía representa una oportunidad estratégica para reducir la huella ambiental y los costos en los procesos industriales. En este sentido, los TCA surgen como una tecnología térmica capaz de revalorizar una energía térmica proveniente de un flujo de calor utilizando una cantidad insignificante de energía eléctrica. A pesar de su potencial, la falta de conocimientos técnicos establecidos y la ausencia de registros exhaustivos de aplicaciones exitosas han limitado su difusión, cuestionándose la viabilidad y confiabilidad de estos dispositivos.

Sin embargo, en el estado del arte se han identificado aplicaciones industriales relevantes de los TCAs registradas en literatura previa e informes no publicados. Según Cudok et al. (2021), entre 1981 y 2019 se instalaron 48 TCAs en 42 plantas industriales, alcanzando una capacidad total de aproximadamente 134 MW. Estas instalaciones se concentraron principalmente en Asia (74%) y en la industria química (61%), destacando la utilidad de los TCAs en sectores con altas demandas térmicas.
El estudio también resalta que entre los principales desafíos para su implementación se encuentran la falta de conocimiento técnico generalizado y los registros insuficientes de instalaciones exitosas. No obstante, la colaboración con fabricantes líderes ha permitido optimizar los diseños y aumentar la confiabilidad de los TCAs.

Los TCA han encontrado diversas aplicaciones en industrias donde se generan grandes cantidades de calor residual. Estas máquinas permiten aprovechar eficientemente ese calor al revalorizarlo a niveles útiles, contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética y a la sostenibilidad ambiental. Según Parham et al. (2014), las principales aplicaciones incluyen la recuperación industrial, los procesos de cogeneración, la desalinización y purificación de agua, así como otros sectores específicos como la industria textil y la producción de caucho sintético.

En el sector de la recuperación de calor industrial, los TCA tienen una alta tendencia a la incorporación en la industria química y petroquímica, donde se generan grandes cantidades de energía térmica residual en procesos como la destilación y la reacción química. Yang et al. (2017) desarrollaron un sistema con TCA en cascada para recuperar calor residual de baja calidad en una refinería de petróleo. Este diseño utilizó ciclos de LiBr, logrando un COP de 0.227 y un tiempo de amortización de solo 1.3 años. Esto nos

da un panorama claro de su viabilidad en este campo industrial donde se desechan grandes cantidades de energía térmica. En el ámbito de la cogeneración, los TCA se integran en ciclos térmicos para aprovechar el calor residual producido junto con la generación de energía eléctrica. Esto ayuda a maximizar el aprovechamiento energético, incrementando el rendimiento de los sistemas. (Yari, 2012) Propuso un ciclo de cogeneración basado en dióxido de carbono supercrítico con recompresión de CO_2 supercrítico, con el objetivo de elevar la temperatura del calor residual y optimizar su reutilización dentro del ciclo. Su estudio concluyó que la combinación del TCA con el ciclo de CO_2 supercrítico representa una solución viable y eficiente para la recuperación de energía térmica en plantas nucleares. Por otra parte, (Donnellan et al., 2015) realizaron un análisis de casos industriales que demostró cómo los TCA pueden mejorar la eficiencia energética en plantas de cogeneración, logrando una notable reducción en emisiones CO_2 y optimizando el uso de la energía térmica.

Otra aplicación destacada de los TCA es en los procesos de desalinización y purificación del agua, donde se emplean para incrementar la temperatura del agua y facilitar su evaporación. Huicochea y Siqueiros (2009) realizaron un experimento en el que un TCA fue integrado con un sistema de purificación de agua. Su diseño permitió incrementar significativamente el COP, demostrando la capacidad de los TCA para aprovechar calor residual de baja calidad en estos sistemas. Además de estas aplicaciones los TCA han sido implementados en la industria textil y en la producción de caucho sintético, sectores donde los procesos generan calor residual que puede ser recuperado. En la industria textil, (Horuz y Kurt, 2010) analizaron la aplicación con un TCA utilizando agua-bromuro de litio (H_2O/ LiBr) para revalorizar la energía residual. Este diseño permitió revalorizar la energía residual, haciendo posible su reutilización en otros procesos internos, como es el calentamiento de agua para los procesos de producción textil, mejorando la eficiencia térmica. Por otra parte, (Ma et al., 2003) implementaron un TCA a escala industrial para recuperar calor industrial liberado a 98 °C. El sistema utilizó agua-bromuro de litio (H_2O/ LiBr), lo cual incrementó la temperatura del agua de 95 a 110°C y alcanzó un COP promedio de 0.47. Este diseño tuvo un tiempo de amortización de aproximadamente dos años, demostrando su viabilidad energética.

A pesar del potencial que pueden representar los TCA en un futuro en diversas industrias, existen pocos trabajos reportados en la literatura relacionados con aplicaciones industriales sobre su uso. Cuando se mencionan, su uso ha estado enfocado principalmente en la producción de vapor, en la industria de la pulpa y el papel, y en la industria petroquímica. Los COP han variado entre 0.45 y 0.47, y los periodos de recuperación entre 2 y 3.1 años (Rivera et al., 2015).

2.2 Métodos de control tradicionales en TCA

A pesar de sus beneficios, los TCA son dispositivos cuya operación resulta compleja debido a la interacción de múltiples variables y la falta de estrategias de control que proporcionen una modulación satisfactoria. Por lo que se buscan nuevas estrategias de control para estos equipos. Las máquinas térmicas por absorción todavía no son una tecnología muy utilizada. Los operadores a menudo se sienten desanimados por la integración más compleja en comparación con los sistemas de bomba de calor por

compresión (Goyal et al., 2019). Sin embargo, la operación de los TCA requiere un control preciso de sus variables críticas, lo cual representa un desafío técnico. En este sentido, los Controladores Lógicos Programables (PLC) se han destacado como una herramienta robusta y versátil para la automatización de procesos industriales, siendo capaces de gestionar diversas variables en condiciones extremas (Bryan & Bryan, 1997). Estudios recientes han explorado métodos de control avanzados y basados en modelos dinámicos para mejorar el rendimiento de los sistemas de absorción (Palenzuela et al., 2014), lo que subraya la importancia de optimizar la integración de estas tecnologías. En este trabajo se propone diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control de las variables críticas de un TCA, utilizando un PLC como herramienta central para garantizar su operación eficiente y dentro de parámetros seguros.

Una de las principales problemáticas que existen con los TCA está relacionada con el control automático de estos equipos, por lo cual se buscan estrategias de control que sean capaces de involucrar todas las variables que se encuentran en el sistema, así como las perturbaciones que afectan a dichas variables. El control de estos dispositivos representa un desafío considerable, como lo menciona Staudt et al. (2023), quienes propusieron un enfoque de control basado en modelos dinámicos con el objetivo de mejorar la capacidad de carga parcial y los rangos de operación de los dispositivos de bombeo de calor por absorción. Este enfoque destaca por su simplicidad, lo que lo convierte en una opción viable para su implementación en PLC estándar, facilitando su integración en sistemas energéticos.

Palenzuela et al. (2014) mencionan la importancia de implementar nuevas estrategias de control para optimizar el rendimiento de las bombas de calor por absorción de doble efecto, enfocándose en ajustes como el control del nivel de solución de LiBr y la gestión del flujo de refrigerante. En su trabajo, emplearon el PLC Siemens S7-300, el cual pone en marcha el sistema, asegura que opere dentro de parámetros seguros, y lo apaga cuando es necesario. En este contexto, Xu et al. (2016) desarrollaron un modelo para la simulación dinámica y el control de un enfriador de absorción de LiBr-H_2O de un solo efecto, contribuyendo al entendimiento de los sistemas de absorción mediante la simulación de su comportamiento en distintas condiciones. En un enfoque experimental, Liu et al. (2017) construyeron un banco de pruebas de un transformador de calor de una sola etapa (SSHT) que empleaba una mezcla binaria de LiBr-H_2O como fluido de trabajo. En este estudio, el uso de un PLC no solo controlaba el sistema, sino que también monitoreaba parámetros importantes para asegurar un funcionamiento óptimo. Asimismo, Goyal et al. (2019) realizaron una revisión crítica sobre las metodologías de control de bombas de calor por absorción, destacando la importancia de los controles avanzados de retroalimentación multivariable y el interés creciente en los métodos basados en datos. Sin embargo, advierten sobre la dificultad de generalizar estos últimos, lo que deja espacio para futuras investigaciones que puedan abordar sus limitaciones. Finalmente, Jing et al. (2020) desarrollaron un modelo dinámico de un transformador de calor de absorción de película descendente vertical utilizando LiBr/H2O como par de trabajo. Este modelo, validado mediante datos experimentales, incluye varios subsistemas auxiliares, como el subsistema de fuente de calor y el subsistema de

control automático PLC, que permiten un control centralizado y el registro de datos en tiempo real, lo que facilita una operación más eficiente y supervisada del sistema.

2.3 Automatización de procesos térmicos con PLC

La automatización en sistemas de bombas de calor ha sido también explorada por Aktaş et al. (2014), quienes diseñaron y probaron un secador de bomba de calor con un programa de control basado en condiciones psicrométricas. Este programa, controlado por un PLC, permitió gestionar múltiples variables del proceso de secado, como la temperatura del aire, la humedad relativa y el flujo volumétrico, ajustando el sistema según los requerimientos específicos del proceso.

Este trabajo presenta un sistema de control de temperatura de un intercambiador de calor utilizando un PLC y un sistema SCADA donde se utiliza el protocolo de comunicación Modbus para su monitoreo remoto y control de variables en tiempo real. Los sistemas SCADA optimizan la producción al reducir costos por pérdidas de materia prima, mejorar la planificación del mantenimiento preventivo y aumentar la eficiencia del personal. Permiten a los operadores tomar decisiones más rápidas con acceso remoto a información precisa. Además, facilitan la comunicación entre PLCs, estaciones de ingeniería y operación, permitiendo el control remoto del proceso. Gracias al uso de algoritmos PI, se logra un control estable y optimización del flujo de vapor, adaptando el proceso ante perturbaciones. (Gómez, 2009)

2.4 Antecedentes

En enero de 2022, Karla Varela Martínez publicó una tesis titulada ″Estudio experimental de un transformador de calor por absorción con intercambiadores helicoidales múltiples anidados″. En su investigación, se describe detalladamente el dispositivo que será utilizado en el presente estudio para su control (Varela, 2022). De manera similar, en 2021, Daniel Moreno Garrido llevó a cabo un proyecto enfocado en la automatización coordinada y remota de dos prototipos de laboratorio mediante un autómata Siemens S7-1500, mostrando cómo estos dispositivos pueden trabajar de manera sincronizada para procesos industriales automatizados.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

En este **Capítulo III** se describen los componentes principales del TCA experimental de 2 kW, así como los dispositivos electrónicos que conforman su sistema de control automatizado, incluyendo sensores y actuadores. Se presenta la función de cada intercambiador de calor; generador, condensador, evaporador, absorbedor y economizador, además de su contribución al ciclo de absorción. También se detallan los elementos de control y monitoreo, como el PLC, las bombas, las resistencias de calentamiento y los sensores de temperatura, presión y flujo, explicando cómo interactúan para mantener las variables críticas del sistema dentro de los rangos deseados.

3.1 Componentes del TCA

El TCA de simple etapa está compuesto por cuatro intercambiadores de calor, donde se llevan a cabo los procesos termodinámicos de generación, condensación, evaporación y absorción. En este caso, el TCA está construido por componentes duales que comparten una misma coraza, la cual fue diseñada para reducir las pérdidas de calor por conducción y convección, además de aportar al estudio de compactación de estos equipos.

Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada del Centro de Investigación en ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp). El TCA se diseñó y construyó con una capacidad de 2 kW con acero inoxidable 316L para reducir su deterioro por corrosión (Varela, 2016)

En la **Figura 3** se muestra el diagrama esquemático del TCA, donde se pueden observar las dos corazas que comparten componentes duales. La coraza inferior contiene el generador y condensador, mientras que la superior tiene el evaporador y absorbedor, ambos arreglos se deben a sus respectivas presiones de operación. Además de contener un intercambiador de calor de soluciones, también conocido como economizador.

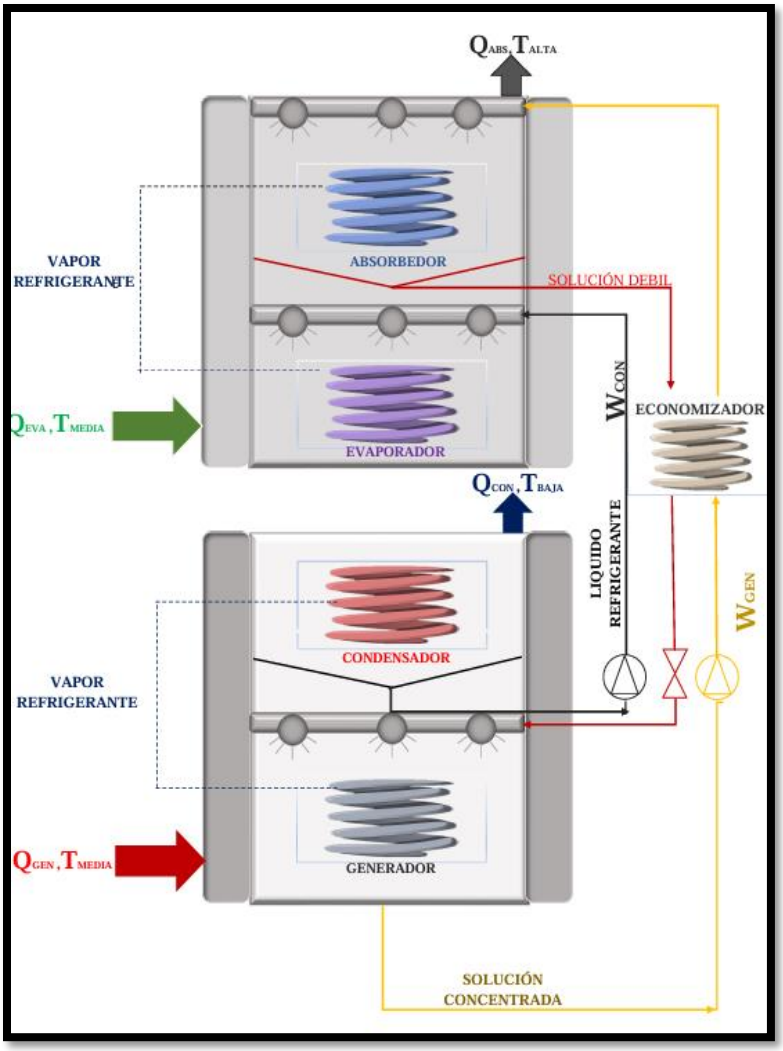


Figura 3. *Diagrama esquemático del TCA experimental*

Generador: Está ubicado en la parte inferior del equipo y comparte la misma coraza con el condensador, como se puede ver en la **Figura 4**. Tiene un coeficiente de transferencia de calor global de 420.2 W/m² °C y está compuesto por cuatro helicoidales anidados con diferente diámetro de enrollamiento. Su principio de operación es mediante película descendente, en el cual los tubos helicoidales son bañados por un distribuidor en forma de regadera. En este componente se lleva a cabo el proceso de generación, donde el vapor se separa del bromuro de litio, generando solución concentrada para su recirculación al absorbedor.

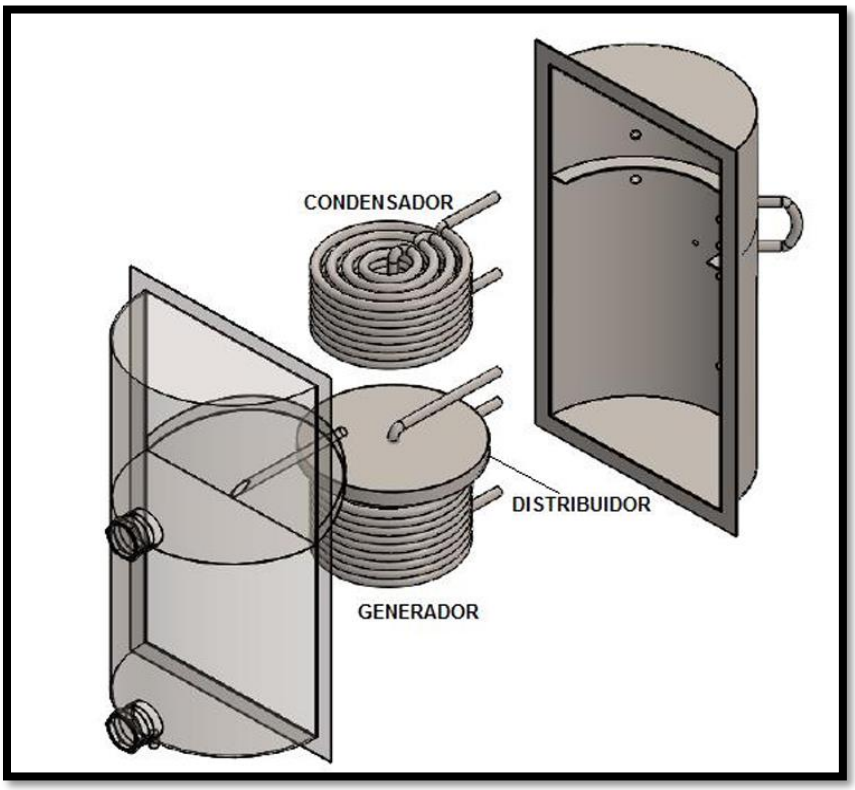


Figura 4. *Coraza generador-condensador (Varela, 2022)*

Condensador: También está ubicado en la parte inferior, compartiendo coraza con el generador, tiene un coeficiente de transferencia de calor global de 1246.7 W/m²·°C. Está compuesto por cuatro helicoidales con ocho vueltas y, al igual que el generador, opera mediante película descendente. Su función principal es la condensación del vapor generado en el generador, facilitando la transición de fase necesaria para el ciclo termodinámico del equipo.

Evaporador: Se encuentra en la coraza superior del equipo, como se muestra en la **Figura 5,** y es un intercambiador de calor helicoidal anidado con cuatro diámetros de enrollamiento diferentes, interconectados en serie, cada uno con ocho vueltas. Opera mediante película descendente y tiene un coeficiente de transferencia de calor global de 731.3 W/m²·°C. En este componente se lleva a cabo la evaporación del refrigerante, absorbiendo calor de la fuente térmica para generar el cambio de fase necesario para el ciclo de absorción.

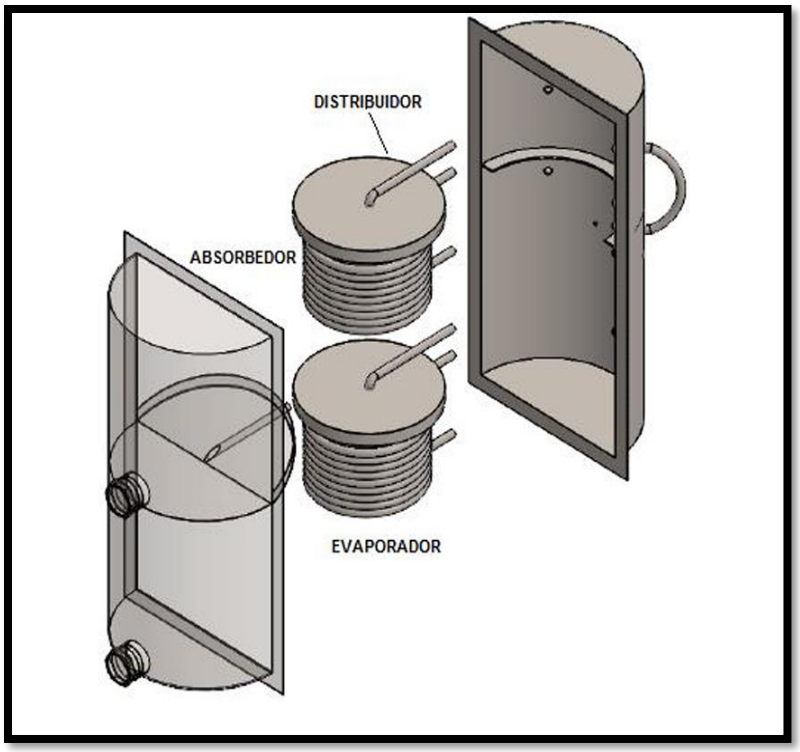


Figura 5*. Coraza evaporador- absorbedor (Varela, 2022)*

Absorbedor: También ubicado en la parte superior del equipo, es un intercambiador de calor helicoidal anidado con nueve vueltas de película descendente. Tiene un coeficiente de transferencia de calor global de 60.7W/m²·°C y su función es absorber el vapor refrigerante generado en el evaporador, permitiendo que la solución concentrada de bromuro de litio lo incorpore al ciclo. Este proceso es fundamental para obtener el calor útil y que facilita la recirculación del fluido de trabajo.

En la **Figura 6** se puede ver el equipo experimental desde el interior de la coraza, donde se aprecia el distribuidor, así como el serpentín del evaporador y el absorbedor. De la misma manera, se encuentran el generador y el condensador.



***Figura 6**. Parte interna de coraza evaporador-absorbedor*

Economizador: Cuenta con 6 vueltas y su función es la de precalentar la solución concentrada, recuperando parte del calor de la solución diluida; por lo tanto, se mejora la reacción exotérmica. Su geometría consiste en tubos concéntricos a contracorriente. En la **Figura 7** se aprecia el TCA experimental con su distribución de los componentes.



***Figura 7.** TCA experimental*

3.2 Dispositivos de control

Los dispositivos de control utilizados para este proyecto se describen a continuación, detallando su funcionamiento, contribución en el sistema de control y sus especificaciones técnicas, las cuales se encuentran en el anexo A.

El PLC es un dispositivo central del sistema de control encargado de gestionar las variables críticas y actuadores involucrados en el sistema. El PLC cuenta con módulos de entradas y salidas digitales además de entradas y salidas analógicas. En la **Figura 8** se muestra el PLC experimental con el que se trabajó.

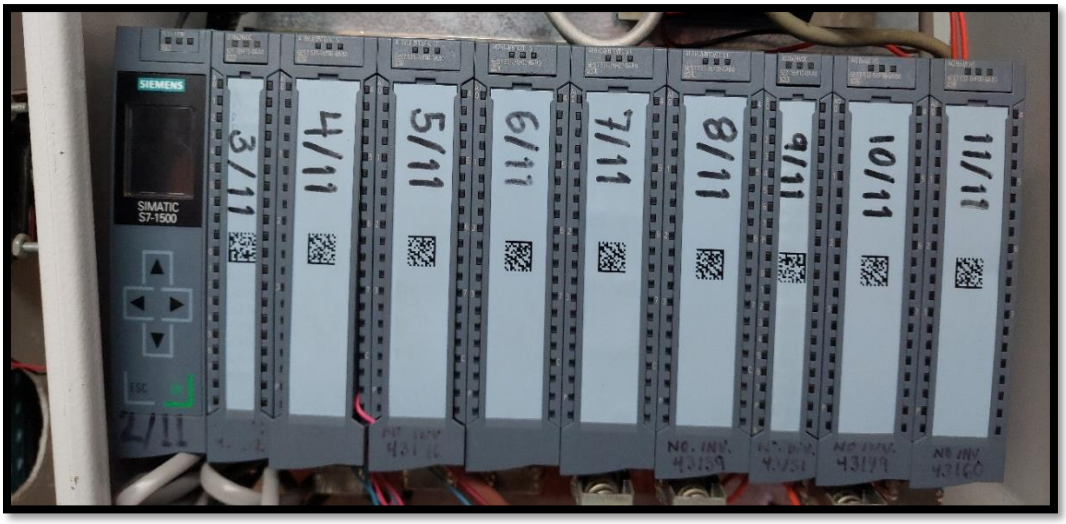


Figura 8. *PLC experimental*

Un tablero de control se integró con cuatro relevadores de estado sólido trifásicos para controlar las 4 resistencias de 220V, ocho relevadores monofásicos para el encendido de las bombas y dos resistencias de 127V. Además, cuenta con protecciones termomagnéticas para cada relevador como se ilustra en la **Figura 9.**

Potenciómetros motorizados: El sistema cuenta con un prototipo de tres potenciómetros motorizados para modificar el caudal enviado por las microbombas (MB). Su mecanismo principal consiste en un motor a pasos que gira el eje del potenciómetro con ayuda de un microcontrolador Arduino.

Adquisidor de datos Agilent: Se utilizó el adquisidor de datos Agilent A34970 únicamente para leer las variables que no pudieron ser agregadas en las entradas del PLC debido a la falta de canales analógicos disponibles.

Resistencias de calentamiento: Se emplearon resistencias eléctricas para calentar los depósitos de las fuentes de calor. Cada depósito contiene una resistencia de 500 W a 127 V, 1000 W a 220 V y 1500 W a 220 V, sumando un total de seis resistencias de control.

El TCA cuenta con tres MB para la circulación del fluido de trabajo y además cuenta con dos bombas presurizadoras que circulan el flujo de agua caliente de las fuentes térmicas.

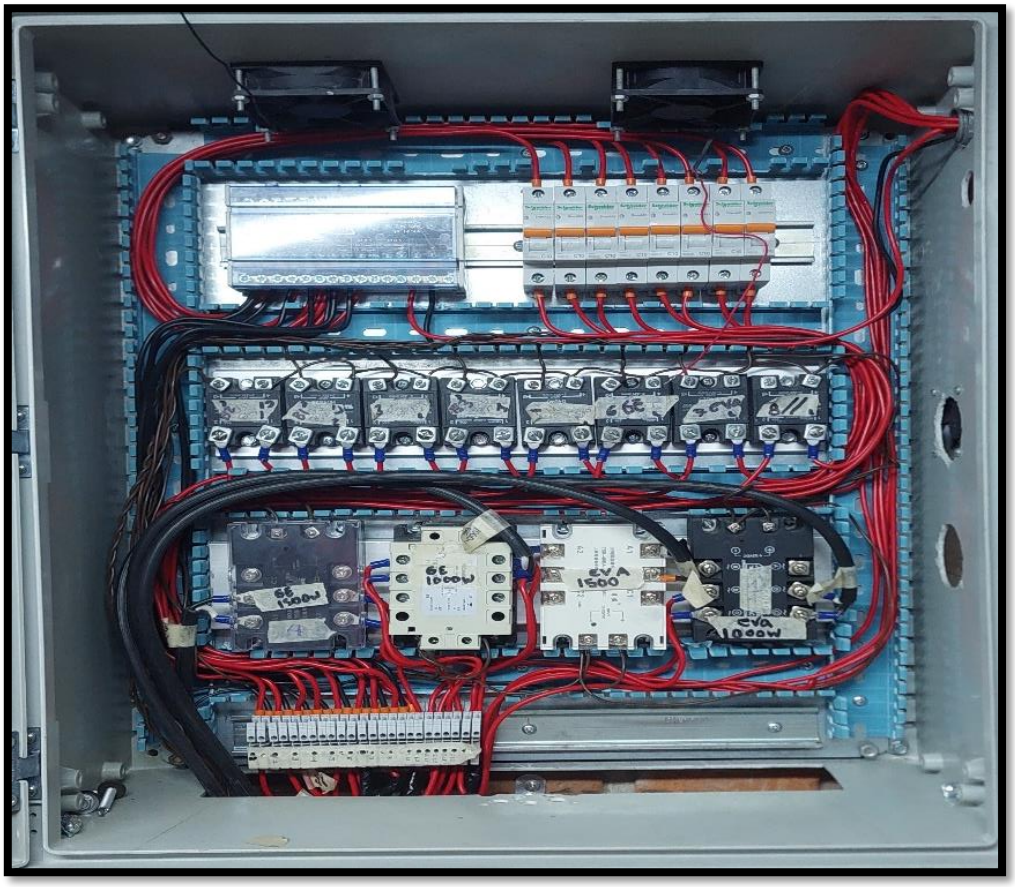


Figura 9. *Tablero de control*

3.3 Sensores de variables críticas

Los sensores utilizados en el sistema permiten medir variables críticas como temperatura, presión y flujo. A continuación, se describen los sensores empleados:

Temperatura: Se utilizaron termo resistencias PT1000 y seis termopares tipo T para el monitoreo de temperatura en puntos clave del sistema.

Presión: Se utilizaron 2 transductores de presión. Debido a inconsistencias en los datos, estos sensores fueron recalibrados en un rango de -23 a 5 inHg Se tomaron 6 lecturas por minuto en el PLC durante 5 minutos para cada diferencia de presión, variando de uno en uno. Posteriormente, se calcularon los promedios de cada valor de presión y se combinaron para obtener la ecuación de la recta, la cual se ingresó al PLC. En la **Figura 10** se puede apreciar que para esto se utilizó un tubo hermético y un manovacuómetro calibrado Ashcroft 68032-02 como referencia. al que se han conectado, los traductores de presión a calibrar con ayuda un manómetro analógico que permite una lectura visual directa de la presión del sistema.



Figura 10. *Calibración de transductores*

En la **Tabla 1** se presentan los datos obtenidos durante la calibración. Dicho procedimiento se realizó a partir de las señales registradas por el PLC; posteriormente, con estos datos se determinó la pendiente y la ecuación de calibración correspondiente, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 1. Resultados de la calibración de los transductores de presión

TP	Circuito	Medición	m	b	R^2
221	GECO	Plg Hg	0.00326607	-29.228	1
222	EVAB	Plg Hg	0.00173267	-25.208	1

Flujo: El equipo cuenta con dos flujómetros analógicos y cinco digitales para la medición del caudal en distintos puntos del sistema.

Cabe destacar que los sensores, excepto los transductores de presión ya habían sido calibrados previamente según (Varela, 2022). En la **Figura 11** se presenta el diagrama del TCA donde se hace la distribución de las variables.

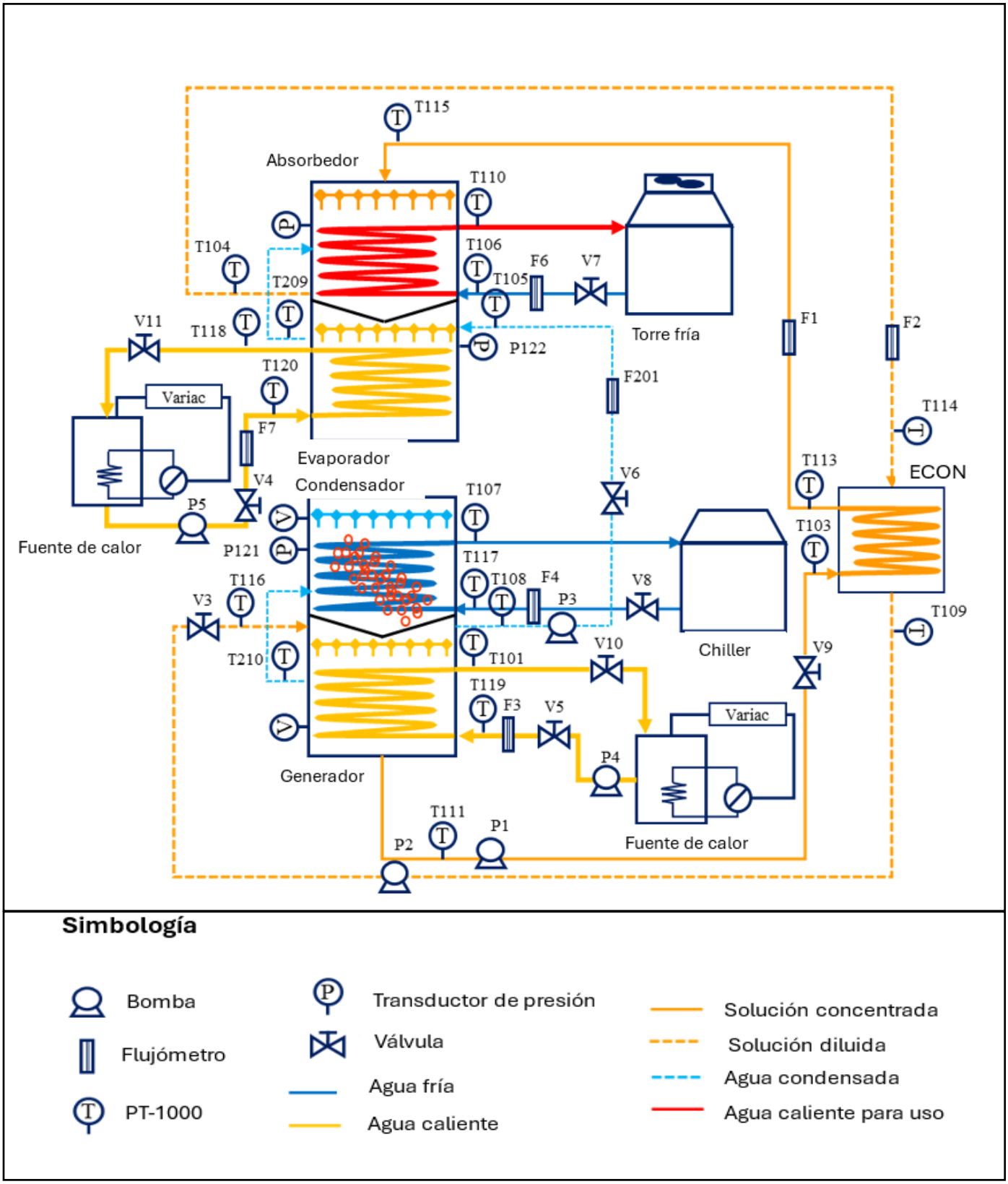


Figura 11. Instrumentación del TCA experimental (López-Pérez et al., 2024)

CAPÍTULO IV. FUNDAMENTO TEÓRICO

El **Capítulo IV** se expone el fundamento teórico de la automatización en procesos térmicos, diferenciándola de la mecanización y señalando sus ventajas, como el aumento de la productividad, la eficiencia energética y el control preciso de variables críticas. Se describe la evolución del control industrial hasta el desarrollo de los PLC, ampliamente utilizados por su flexibilidad y robustez. Finalmente, se analizan las características del software LabVIEW, destacando su facilidad de uso, compatibilidad con instrumentos y funciones de análisis, además de presentar ejemplos de aplicación en procesos térmicos industriales y educativos, donde la combinación de PLC y LabVIEW ha demostrado eficiencia y adaptabilidad.

4.1. Automatización de procesos industriales y térmicos

Según Moreno (2001), la automatización consiste en eliminar total o parcialmente la intervención humana en la ejecución de diversas tareas, ya sean industriales, agrícolas, domésticas, administrativas o científicas. Esta puede aplicarse tanto en procesos simples, como la regulación de la temperatura de un horno o el control secuencial de una máquina, hasta en procesos más complejos, como la automatización de un sistema bancario.

A diferencia de la mecanización, que se limita a reemplazar el esfuerzo físico humano por máquinas, la automatización hace uso de la tecnología disponible para conducir y controlar un proceso, situándose en un nivel superior. Actualmente, los problemas asociados a la automatización industrial y administrativa son abordados principalmente por especialistas en automática e informática, respectivamente.

La automatización juega un papel fundamental en el aumento de la productividad y en la mejora de la calidad de los productos o servicios. Los principales componentes de un sistema automatizado son: los transductores y sensores encargados de captar información del proceso, los pre-accionadores (como relés y contactores), los accionadores (motores, cilindros, válvulas, entre otros), así como los dispositivos de tratamiento de la información, en particular los controladores basados en microprocesadores o sistemas computacionales. La elección y naturaleza de estos elementos depende del tipo de sistema automatizado que se desea implementar, ya sea un sistema secuencial o un servosistema (Moreno, 2001).

4.1.1 Ventajas y retos

La implementación de tecnologías de automatización y sensores ha revolucionado los tratamientos térmicos aplicados en industrias energéticas y de gestión de residuos. Estas tecnologías permiten un control preciso de parámetros críticos como la temperatura, presión y tiempo de residencia, lo que se traduce en una mayor eficiencia energética y menores emisiones contaminantes (Buratto et al., 2024).

Además, su integración con herramientas de la Industria 4.0 como el internet de las cosas, PLC y analítica de datos permite desarrollar sistemas controlados de tratamiento térmico, capaces de responder de forma dinámica a las condiciones del proceso. Estos avances facilitan una producción más sostenible, generando diversas formas de energía como electricidad, calor y biocombustibles, a partir de residuos sólidos y biomasa. No obstante, estos beneficios conllevan una serie de desafíos. Entre los principales se destacan los altos costos de implementación, la complejidad técnica, la sensibilidad del proceso a la calidad del material tratado, y la escasez de datos sobre la generación de gases contaminantes bajo distintas condiciones operativas. Asimismo, la necesidad de realizar simulaciones dinámicas complejas dificulta la adopción masiva en contextos con recursos limitados. En resumen, si bien la automatización y los sensores aportan ventajas significativas en los tratamientos térmicos, su adopción debe considerar cuidadosamente los desafíos técnicos y económicos para garantizar una transición efectiva hacia sistemas energéticos más sostenibles

4.2 Tecnologías disponibles para control automático

El control industrial ha experimentado cambios significativos a lo largo del tiempo, desde los primeros sistemas desarrollados durante la Revolución Industrial, a finales del siglo XIX y comienzos del XX. En un principio, estos sistemas se basaban en componentes mecánicos y electromecánicos, como engranajes, palancas, relés y motores. A partir de los años cincuenta, comenzaron a implementarse los semiconductores, que permitieron desarrollar sistemas de control más compactos, con menor consumo de energía, mayor velocidad de operación y menor desgaste. En los años setenta, se introdujeron los circuitos integrados programables basados en microprocesadores, lo que permitió diseñar sistemas de mayor complejidad y mejores prestaciones. Al mismo tiempo, los ordenadores digitales también evolucionaron; sin embargo, su uso quedaba restringido al control de procesos muy complejos, debido a su alto costo, la necesidad de personal especializado para su monitoreo, y la baja facilidad de interconexión (interfaz) con los procesos industriales, que implican el manejo de altas tensiones y corrientes, para las cuales los ordenadores digitales no estaban preparados. La demanda en la industria de un sistema económico, robusto, flexible, de fácil modificar y capaz de trabajar con mayores tensiones y corrientes que las que podía manejar un ordenador digital llevó al desarrollo del controlador lógico programable (PLC) que hasta el día de hoy sigue siendo ampliamente utilizado en la automatización y control industrial (Balcells et al., 1997)

4.3 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de desarrollo gráfico que se utiliza para desarrollar sistemas de control y monitoreo automatizados de manera intuitiva en lugar de código tradicional. Este entorno, cuando se combina con dispositivos de adquisición de datos y una computadora personal, permite la integración con diversos instrumentos y proporciona interfaces de usuario completas, lo que facilita el control de equipos, así como la recopilación integrada lo que facilita el control de dispositivos, así como el procesamiento y visualización de datos. Los instrumentos virtuales (VIs) en LabVIEW se manipulan a través de un panel frontal que contiene controles e indicadores visuales, y cada VI posee un diagrama de bloques correspondiente, desarrollado mediante el lenguaje gráfico G, que define el flujo de datos entre funciones y estructuras internas (Sivaranjani et al., 2020), como se muestra en la **Figura 12**. Este software ha ganado popularidad tanto en la industria, para el desarrollo de aplicaciones de control de procesos, como en el ámbito académico y de investigación, gracias a su gran variedad de bibliotecas y su interfaz sencilla e intuitiva, lo que lo convierte en un entorno de programación muy útil para diseñar sistemas de control y monitoreo.

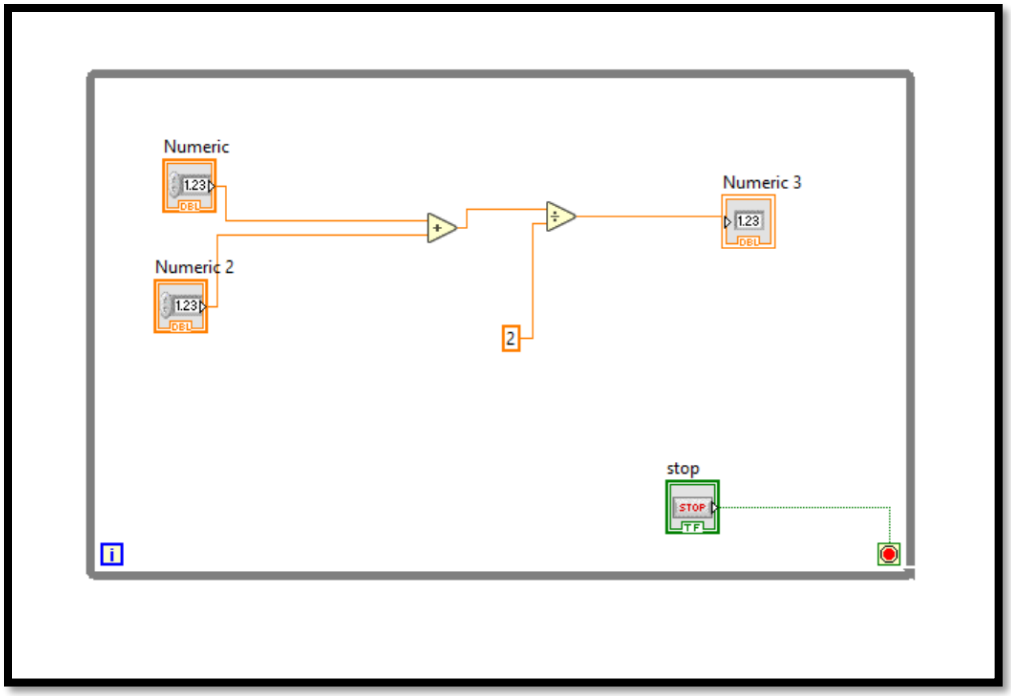


Figura 12. *VI LabVIEW*

4.3.1 Características de LabVIEW

LabVIEW ofrece un entorno ágil y accesible para el desarrollo de sistemas automatizados, destacando sus características más importantes:

1. Compatibilidad con instrumentos de cualquier fabricante.
2. Interfaz de usuario nativa que permite monitorear y controlar las pruebas de manera eficiente.
3. Amplia gama de funciones de análisis orientadas a la ingeniería.
4. Integración con lenguajes de programación populares como Python, C y .NET.

4.3.2 Implementación en entornos industriales

En el trabajo de Bernal Zambrano, Guzmán Chávez y Vargas Rodríguez (2017), se desarrolló un sistema de control de temperatura utilizando un enfriador termoeléctrico (TEC), controlado mediante un programa implementado en LabVIEW. Para regular la temperatura del sistema, diseñaron un controlador PID virtual, capaz de manipular el voltaje aplicado al TEC y ajustar dinámicamente la temperatura en función del valor objetivo. Los resultados demostraron que el control PID respondía con rapidez y precisión, minimizando las oscilaciones una vez alcanzada la temperatura deseada. Este trabajo valida el uso de controladores PID en sistemas térmicos y demuestra la eficiencia de LabVIEW para aplicaciones de control y automatización.

Un ejemplo destacado del uso de LabVIEW en la automatización de procesos térmicos es el trabajo de Balderas-Zapata et al. (2008), donde se desarrolló un sistema automatizado para el control de temperatura en un proceso de crecimiento de películas

delgadas de $Cd_{1-x}Zn_xTe$ mediante el método CSVT-FE. En dicho estudio, se implementó un controlador PI para regular la temperatura de bloques de grafito utilizados como fuentes de evaporación, con funciones de calentamiento tipo rampa y escalones programables desde una interfaz desarrollada en LabVIEW. Las temperaturas eran monitoreadas en tiempo real y los datos registrados automáticamente. Este sistema permitió obtener películas con un buen control en su composición y espesor, evaluadas mediante EDAX y espectroscopía óptica.

Wutthithanyawat y Srisiriwat (2014) desarrollaron un laboratorio virtual para el control de temperatura en un sistema de convección forzada usando LabVIEW y una tarjeta DAQ USB-6008. El sistema consistía en un ducto rectangular con un ventilador y un banco de tubos calefactores, donde la temperatura se regulaba mediante control PID, ajustando la potencia del calentador y la velocidad del aire. Se diseñó una interfaz gráfica en LabVIEW para monitoreo en tiempo real, control de variables y activación de alarmas. Los resultados demostraron que el sistema facilitó el aprendizaje práctico en ingeniería de control, redujo la dependencia de equipos físicos y permitió el acceso remoto, mejorando la eficiencia del laboratorio educativo. El artículo "Visualization of virtual environment through LabVIEW platform" presenta aplicaciones desarrolladas en LabVIEW para simular y controlar sistemas como temporizadores, semáforos, motores DC y gestión de bases de datos. Destaca la capacidad de LabVIEW para sustituir hardware físico mediante programación gráfica, permitiendo la adquisición y control de datos de forma flexible y eficiente (Suresh, 2020).

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

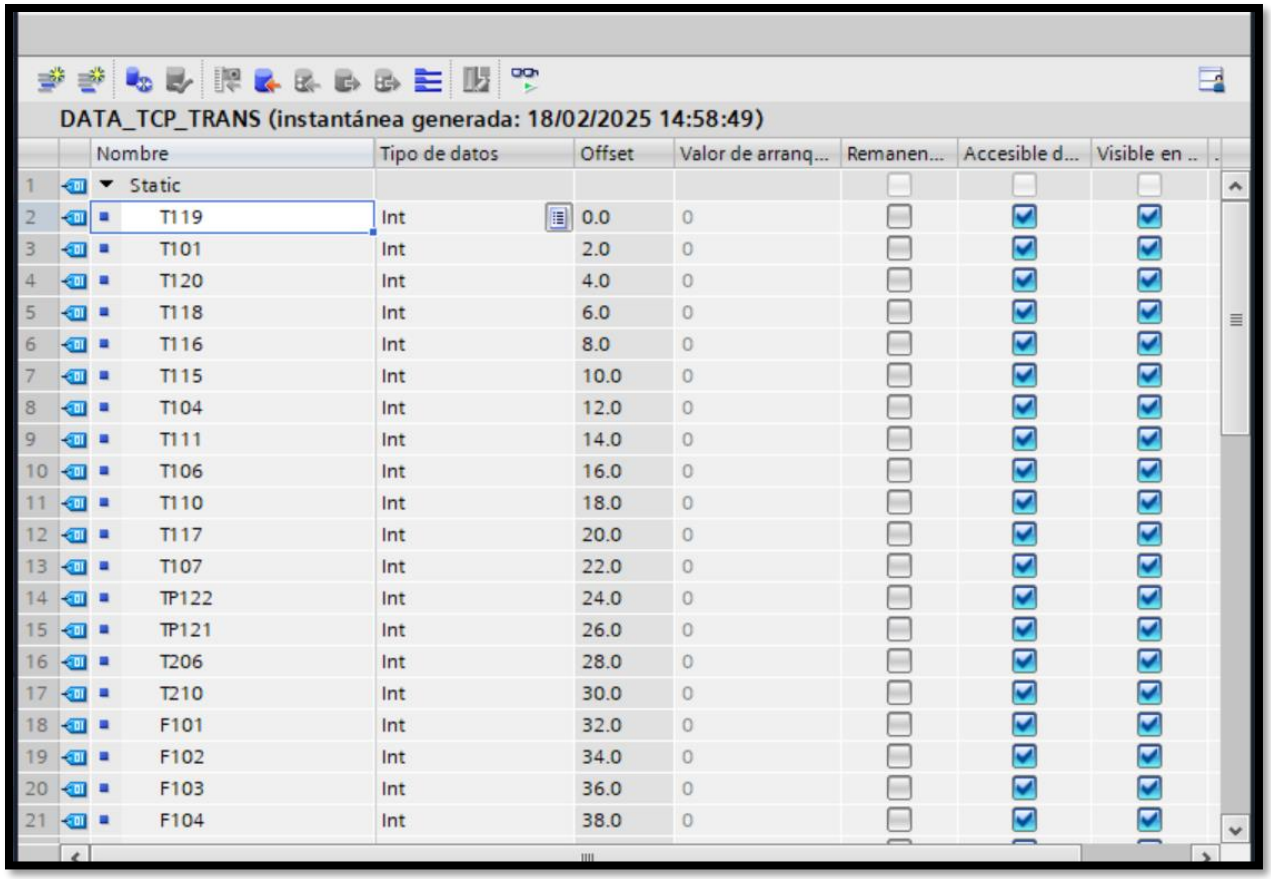
En este **Capítulo V** se describe la metodología seguida para el diseño e implementación del sistema de monitoreo y control del TCA. Se detalla la selección y organización de las variables críticas del equipo, la programación del PLC en TIA Portal y el desarrollo de la interfaz gráfica en LabVIEW, la cual permite al usuario visualizar y ajustar en tiempo real parámetros como temperatura, flujo y posición de las MB. Se explican las diferentes alternativas evaluadas para el control de las MB, destacando la selección e implementación de potenciómetros motorizados con retroalimentación mediante Arduino. Además, se presentan la instalación eléctrica, la integración de sensores y actuadores, y el control automático mediante relevadores y controladores PID. Finalmente, se describen las pruebas iniciales, el mantenimiento preventivo y correctivo del TCA, y los protocolos de validación realizados para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de control y su desempeño experimental.

5.1 Diseño del sistema de monitoreo y control

Para el diseño del sistema, se llevó a cabo la conexión y organización de todas las variables críticas del TCA. En primer lugar, se realizó una revisión de la capacidad del PLC, considerando las entradas y salidas disponibles. Se definieron 12 salidas digitales, las cuales se conectaron a los relevadores de estado sólido. Para las entradas, se integraron sensores y dispositivos de medición, incluyendo 2 termopares, 14 termorresistencias RTD, 2 transductores de presión y un flujómetro digital. Cabe señalar que las resistencias RTD requieren dos canales analógicos por cada sensor, lo que reduce la capacidad total del PLC.

Una vez establecidas las conexiones de las variables, se desarrolló una estructura de siglas para la identificación de variables, basada en el componente, la marca, la ubicación y la función de cada una de ellas, como se muestra en la **Figura 13**. Esta estandarización permite una manipulación más eficiente de las variables dentro del programa, facilitando su identificación.

Finalmente, para garantizar que las señales sean interpretadas por el operario, se inició el desarrollo de un protocolo de comunicación entre el PLC y LabVIEW, con el objetivo de transmitir y visualizar datos en tiempo real, para lo cual se realizó el bloque de datos de las variables adquiridas por el PLC, este bloque nos sirve para recibir y enviar datos a través del protocolo de comunicación Modbus TCP y en el PLC está nombrado DATA_TCP_TRANS, como se muestra en la **Figura 14.**



DATA_TCP_TRANS (instantánea generada: 18/02/2025 14:58:49)

	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Visible en ...
1	Static						
2	T119	Int	0.0	0			
3	T101	Int	2.0	0			
4	T120	Int	4.0	0			
5	T118	Int	6.0	0			
6	T116	Int	8.0	0			
7	T115	Int	10.0	0			
8	T104	Int	12.0	0			
9	T111	Int	14.0	0			
10	T106	Int	16.0	0			
11	T110	Int	18.0	0			
12	T117	Int	20.0	0			
13	T107	Int	22.0	0			
14	TP122	Int	24.0	0			
15	TP121	Int	26.0	0			
16	T206	Int	28.0	0			
17	T210	Int	30.0	0			
18	F101	Int	32.0	0			
19	F102	Int	34.0	0			
20	F103	Int	36.0	0			
21	F104	Int	38.0	0			

Figura 13. Siglas de las variables

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Visibl...	Acces...	Comment
5	RE.1000W220V.G.FC	RES-CALENTAMIEN...	Bool	%Q1.2				
6	RE.1000W220V.E.FC	RES-CALENTAMIEN...	Bool	%Q1.5				
7	F.B2.G.FC	FLUJOMETROS	Int	%IW74				
8	F.MC.CE.AC	FLUJOMETROS	Int	%IW78				
9	F.B2.E.FC	FLUJOMETROS	Int	%IW76				
10	F.B2.A.AE	FLUJOMETROS	Int	%IW80				
11	F.B2.C.AE	FLUJOMETROS	Int	%IW2				
12	BD.CP.E.SC	MICROBOMBAS	Int	%QW2				
13	BD.CP.GE.SD	MICROBOMBAS	Int	%QW4				
14	BD.CP.CE.AC	MICROBOMBAS	Int	%QW6				
15	ST.PT.G.FCE	PT1000_SENSORES	Int	%IW66				
16	ST.PT.G.FCS	PT1000_SENSORES	Int	%IW18				
17	ST.PT.E.FCE	PT1000_SENSORES	Int	%IW22				
18	ST.PT.E.FCS	PT1000_SENSORES	Int	%IW26				
19	ST.PT.G.SDE	PT1000_SENSORES	Int	%IW30				
20	ST.PT.G.SCS	PT1000_SENSORES	Int	%IW34				
21	ST.PT.A.SDS	PT1000_SENSORES	Int	%IW38				
22	ST.PT.A.SCE	PT1000_SENSORES	Int	%IW42				
23	T.T.CGC.VR	TERMOPARES	Int	%IW70				
24	T.T.CEA.VR	TERMOPARES	Int	%IW72				
25	ten2	TERMOPARES	Int	%MW80				
26	TP.CP.CEA.EA	TRANDUCTORES_D...	Int	%IW10				
27	TP.CP.CGC.GC	TRANDUCTORES_D...	Int	%IW12				

Figura 14. *Bloque de datos Modbus TCP*

Una vez definida la estructura de las variables en el programa TIA Portal V 13, se procedió a programar la lectura de las variables (ver **Figura 15)** y el encendido y apagado de las bombas del TCA, utilizando lenguaje de escalera (ver **Figura 16)**. Posteriormente, se diseñó la instalación eléctrica para controlar los relevadores que operan las bombas y las resistencias. Además, se modificaron los contactos que alimentan las bombas del TCA para que estos contactos estén controlados desde el PLC.

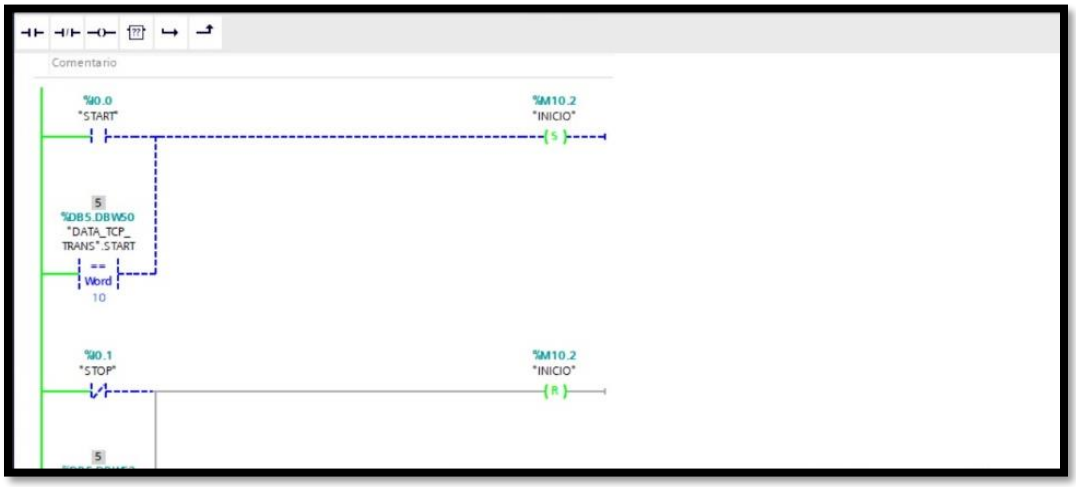


Figura 15. *Programación de escalera*

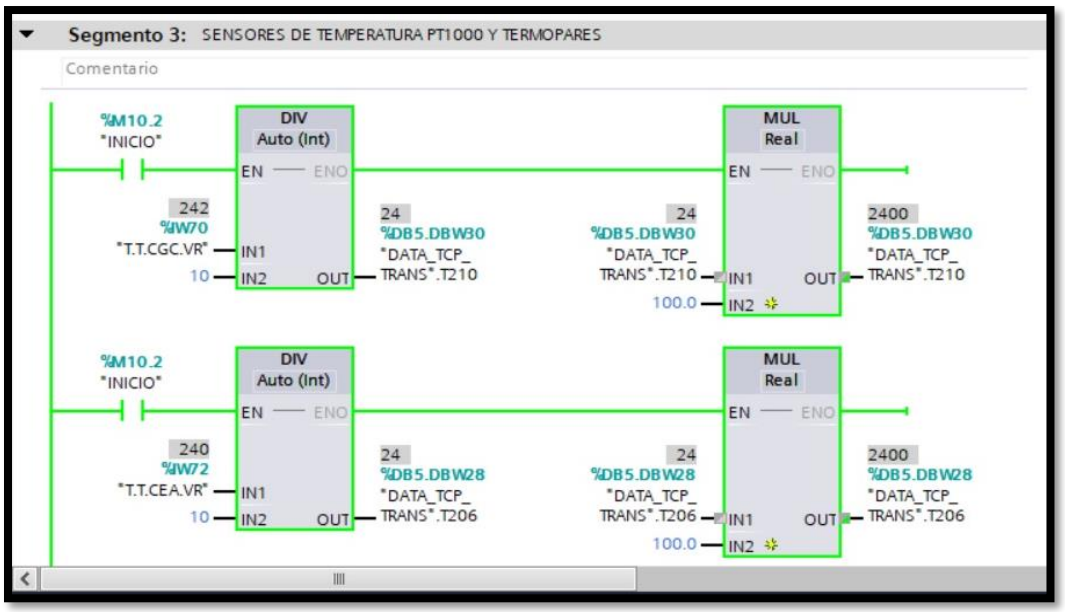


Figura 16. *Bloques de lectura de sensores de temperatura*

Una vez implementado el control lógico, se diseñó la instalación eléctrica para la operación de los relevadores, los cuales permiten el accionamiento de las bombas y las resistencias. Además, se modificaron los contactos que alimentan las bombas del TCA,

de modo que estén controlados directamente desde el PLC. En la **Figura 17** se muestra una fotografía de la instalación y tablero de control.

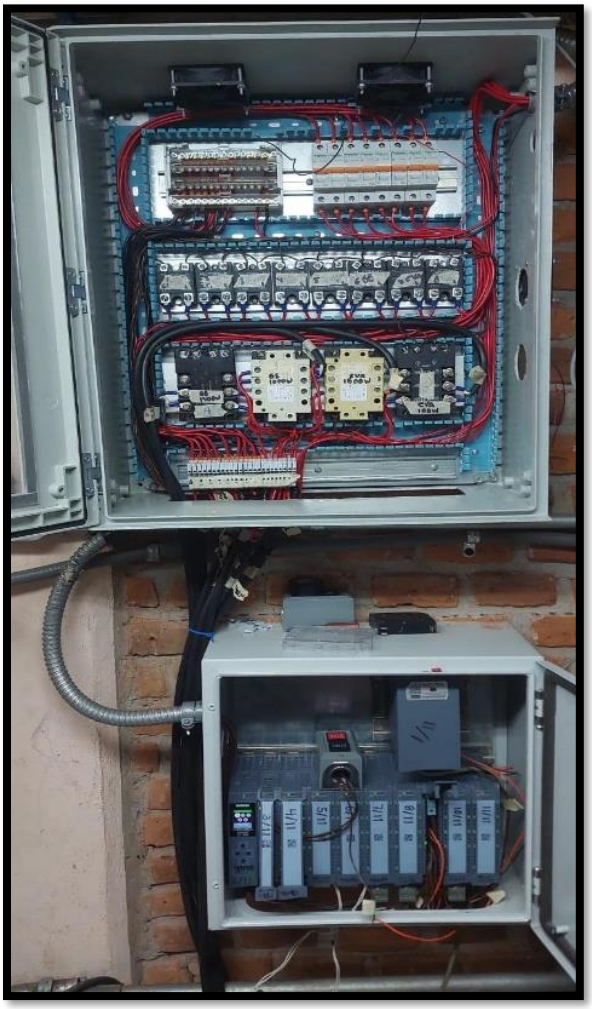


Figura 17. *Sistema de control completo*

5.1.1 Descripción y armado de la propuesta de control para una MB

Las MB utilizadas en el TCA son controladas manualmente mediante un potenciómetro que permite regular la velocidad de rotación del motor. Por esta razón, se realizó una revisión electrónica de la tarjeta de control de la bomba. Durante dicha revisión (véase la **Figura 18**), se identificó que el potenciómetro instalado tiene una resistencia nominal de 10 kΩ. A partir de este hallazgo, se desarrollaron tres propuestas para implementar el control de la bomba:

1. Controlar la MB con un servomotor que mueva la perilla del potenciómetro.
Esta propuesta consiste en utilizar un servomotor para girar la perilla del potenciómetro, de manera que se controlen las revoluciones del motor. Ventajas: Permite un control sin necesidad de intervenir electrónicamente en la bomba. Desventajas: El servomotor puede mover la perilla, pero carece de retroalimentación, lo que podría generar errores

en el control, ya que no se puede asegurar que el sistema esté funcionando correctamente.

2. Realizar una nueva tarjeta de control utilizando ingeniería inversa.
Esta propuesta implica desarrollar una nueva tarjeta de control mediante ingeniería inversa, para poder hacer las modificaciones necesarias que permitan controlar directamente la MB desde el PLC, sin necesidad de ajustes mecánicos adicionales en el sistema. Ventajas: Permite un control más directo y preciso de la MB, sin necesidad de ajustes mecánicos adicionales. Desventajas: El tiempo requerido para diseñar y calibrar este control es considerable, lo que hace que no sea una solución adecuada para este proyecto, debido a limitaciones de tiempo.

3. Utilizar un potenciómetro motorizado.
Este tipo de potenciómetro se ajusta mediante un motor. Para ello, se realizaron pruebas con diferentes tipos de motores, y se determinó que el motor más adecuado para este caso es un motor paso a paso, debido a su capacidad para realizar movimientos más finos y precisos en comparación con otros motores. El potenciómetro utilizado es un modelo doble, que permite que los dos potenciómetros se ajusten al mismo valor mediante el movimiento del eje. Esto ayuda a que uno de los potenciómetros esté conectado a la placa de control y el otro se conecte a un suministro de 5 V, lo que permite conocer la posición del motor. Ventajas: Ofrece un control preciso y cuenta con retroalimentación. Desventajas: Involucra un proceso mecánico para mover el potenciómetro con el motor paso a paso, lo que reduce ligeramente la fiabilidad en comparación con un control completamente electrónico.

Implementación de la propuesta seleccionada para el control de la MB
Después de analizar las opciones, se decidió optar por la tercera propuesta (potenciómetro motorizado). Su ensamblaje se muestra en la **Figura 19**. A continuación, se detalla el proceso de implementación:

1. Programación del Arduino.
Se desarrolló la programación de un controlador de lazo cerrado en Arduino, en el cual se establece un punto de referencia (setpoint) para la posición deseada del potenciómetro. El sistema recibe retroalimentación sobre la posición actual del potenciómetro, y, según la diferencia entre la posición actual y la deseada, el Arduino ajusta el movimiento del motor paso a paso (izquierda o derecha).

2. Pruebas del sistema.
Se realizaron pruebas con los controles y el sistema funcionó correctamente, logrando el control preciso de las revoluciones del motor de la MB.



Figura 18. *Tarjeta de control de la microbomba motorizada*

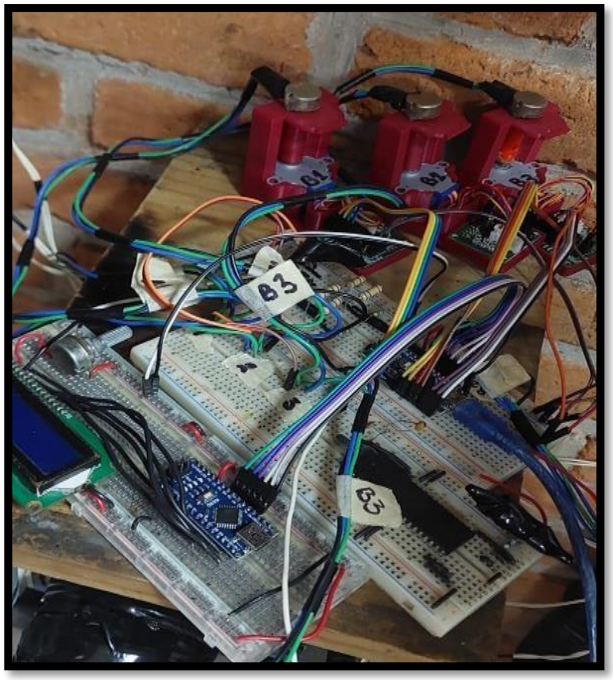


Figura 19. *Circuito potenciómetro*

3. Diseño de la base en SolidWorks.

Se diseñó la base que sostiene el motor a pasos y el potenciómetro doble, como se muestra en la **Figura 20**, mientras que en la **Figura 21** se observa la unión de las tres bases destinadas para las tres MB. El diseño fue impreso en 3D para asegurar la precisión mecánica y minimizar los errores en los movimientos del sistema.

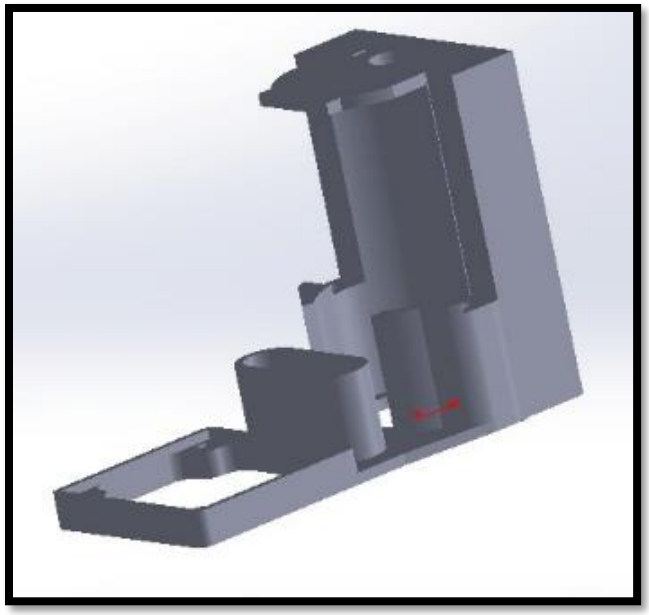


Figura 20. *Base de motor y potenciómetro*

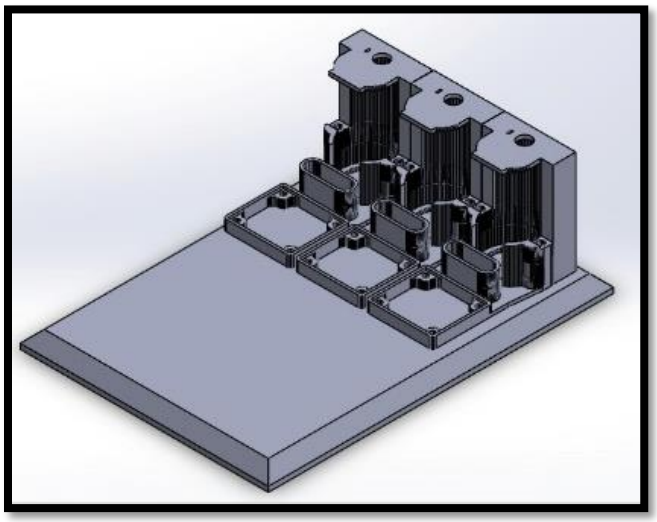


Figura 21. *Soporte para las tres bases*

4. Diagrama electrónico y diseño del circuito.

Se desarrolló el diagrama del circuito electrónico que controla el potenciómetro motorizado. Asimismo, se diseñó el circuito eléctrico del tablero de control. Ambos diagramas se pueden ver en el **Anexo B**, con el objetivo de facilitar la comprensión del trabajo eléctrico para las personas que operarán este nuevo sistema de control. En la **Figura B1** se muestra la integración de ambos sistemas.

5. Integración del PLC.

Finalmente, se integró el PLC con la interfaz gráfica diseñada para realizar las pruebas correspondientes al sistema, asegurando su correcta operación en el entorno de control. Con estos pasos, se logró implementar un sistema de control preciso y eficiente para la MB, con la capacidad de ser operado de manera sencilla y clara para los usuarios como se puede observar en la **Figura 22.**

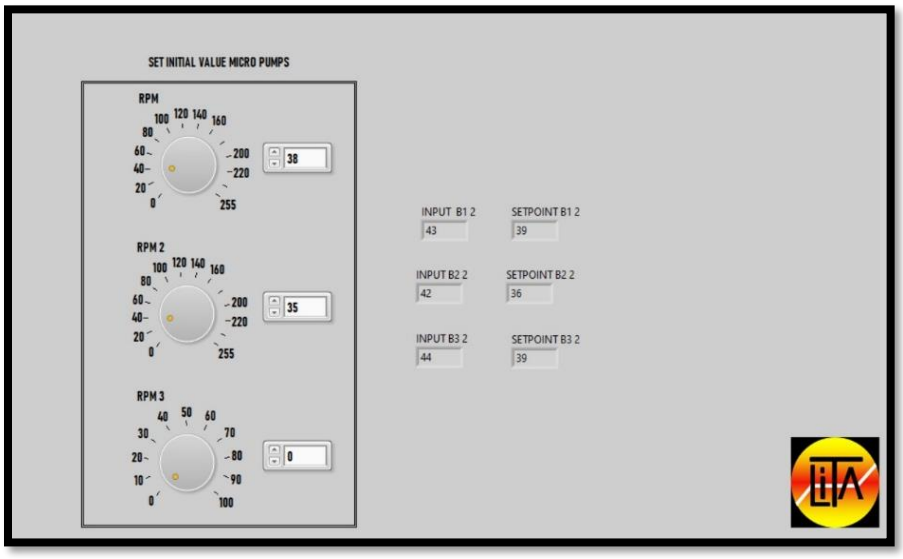


Figura 22. *Integración microbombas en la interfaz*

5.2 Desarrollo de la interfaz gráfica en LabVIEW

Se diseñó una interfaz intuitiva que permite al usuario interactuar fácilmente con el sistema de control del PLC. Esta interfaz fue desarrollada en LabVIEW 2018, haciendo uso de diversas funciones y librerías, entre ellas la librería Modbus TCP (ver **Figura 23**). En su construcción se incorporaron distintos elementos visuales como botones, indicadores, gráficas, barras y perillas, todos ellos enfocados en facilitar la operación del sistema.

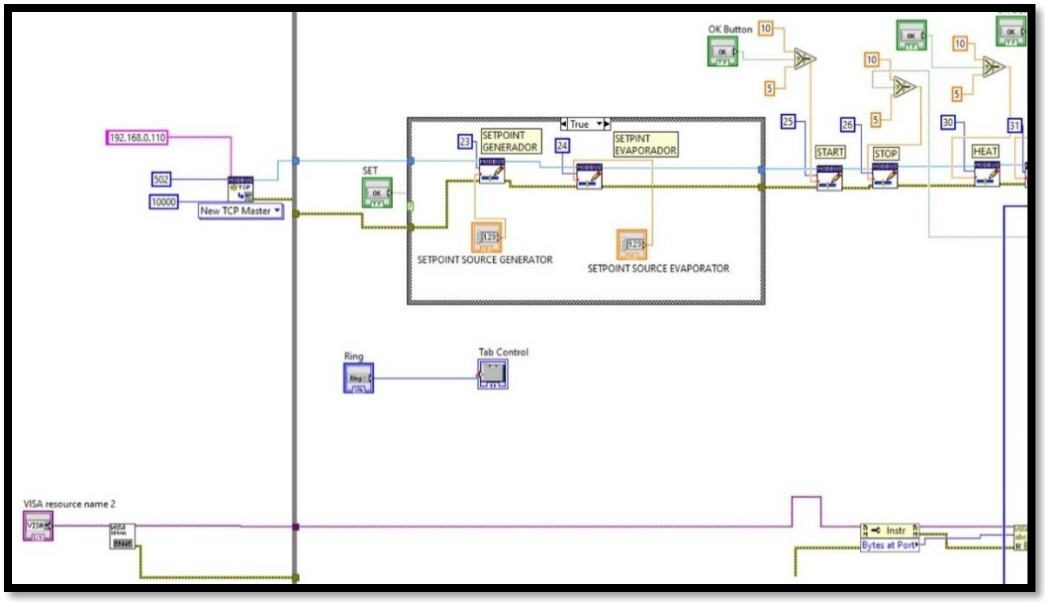


Figura 23. *Programación Modbus TCP*

El diseño gráfico de la interfaz contempló la representación en tiempo real de la temperatura de las fuentes de calor mediante gráficas, como se puede observar en la **Figura 24**. Asimismo, se agregaron barras de control que permiten ingresar los valores de referencia (setpoint). Para facilitar la supervisión del sistema, se utilizaron indicadores para mostrar el estado de las resistencias de calentamiento. Además, se integraron perillas que permiten establecer las posiciones deseadas de las MB. Complementariamente se integró una sección dedicada al almacenamiento de datos (**Figura 25**), la cual permite guardar la información adquirida en archivos Excel para su análisis posterior.



Figura 24. *Parte de calentamiento de las fuentes*



Figura 25. *Guardar datos en Excel*

La comunicación se estableció mediante el protocolo Modbus TCP, empleando la biblioteca correspondiente de LabVIEW, llamada “Modbus Library” como se puede ver en la **Figura 26**, el cual permite tanto la lectura de las variables adquiridas como el envío de señales de ajuste desde la interfaz, tales como los setpoints de temperatura y las posiciones de las MB. Es importante destacar que LabVIEW actúa únicamente como plataforma de visualización y adquisición de datos, ya que el control automático del sistema es realizado directamente por el PLC. En este esquema, la interfaz gráfica se limita a mostrar los valores medidos en tiempo real y a transmitir los valores de referencia establecidos por el usuario.

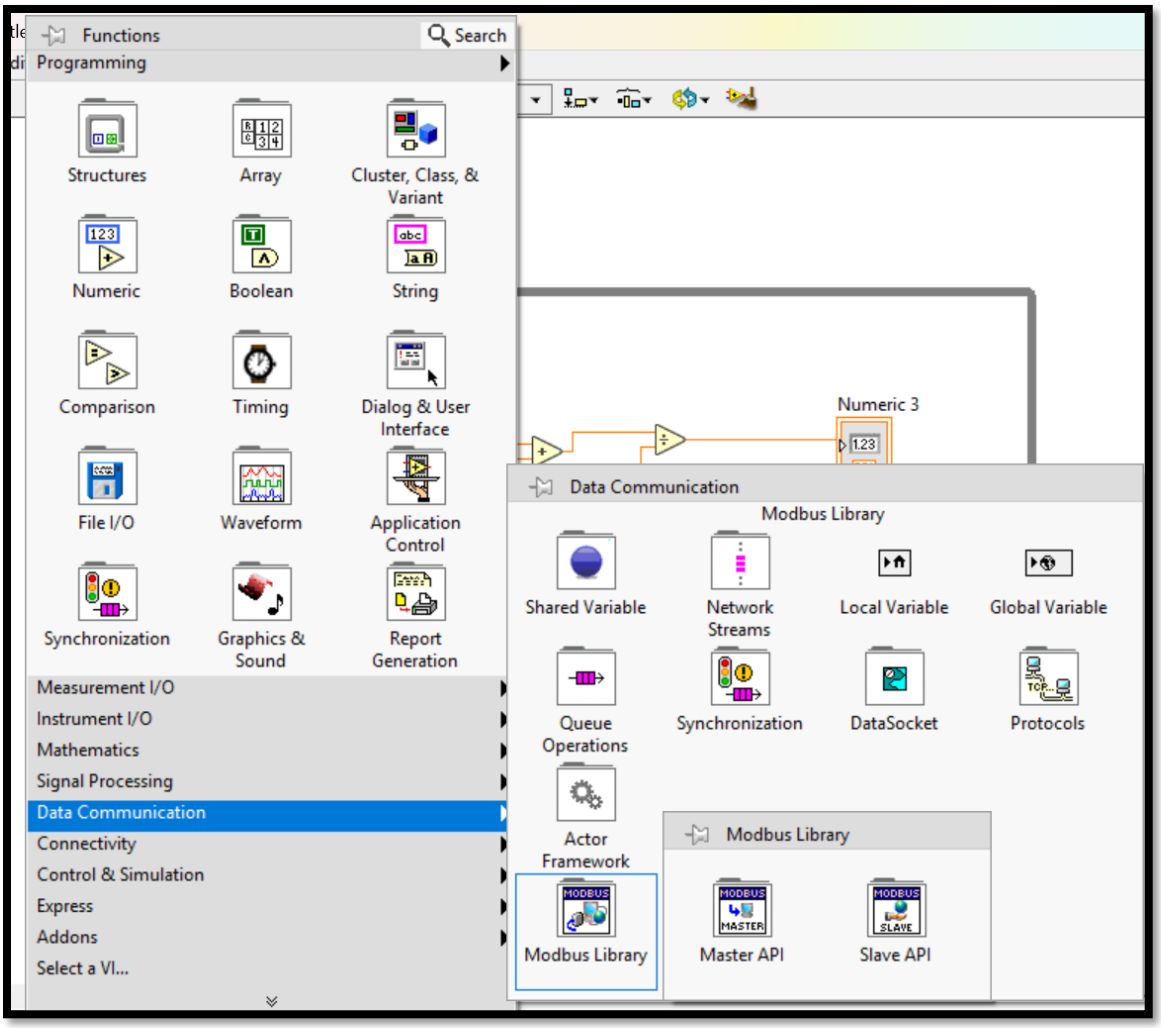


Figura 26. *Librería Modbus TCP*

Una vez desarrollada la interfaz, se realizaron pruebas funcionales con el objetivo de verificar su correcto desempeño. Se comprobó que todas las variables fueran leídas adecuadamente y que los actuadores respondieran de manera precisa a los comandos enviados desde la interfaz. Asimismo, se validó que la interfaz reaccionara en tiempo real ante los cambios introducidos en los valores de setpoint, lo cual permitía observar de inmediato los efectos sobre las variables controladas. También se evaluó el correcto

funcionamiento del PLC mediante la activación y desactivación de sistemas y relevadores, comprobando así el comportamiento esperado de los sistemas de control, electrónicos y eléctricos.

5.3 Implementación del control automático

El control automático del sistema fue delegado completamente al PLC, el cual regula el encendido de los diferentes actuadores mediante relevadores de estado sólido. Para ello se utilizaron siete relevadores monofásicos: dos de ellos se emplearon para accionar las resistencias de calentamiento de 500 W, dos más para controlar las bombas presurizadoras que impulsan el flujo de agua hacia las fuentes de calentamiento, y los tres restantes para el encendido de las MB responsables del movimiento de la solución de trabajo. En el caso particular de las resistencias de calentamiento de 220 V, se utilizaron relevadores de estado sólido trifásicos, adecuados para soportar la carga correspondiente.

La automatización de las fuentes de calor se logró mediante la conexión conjunta de las tres resistencias de cada fuente, de modo que los relevadores de estado sólido correspondientes a una misma fuente estuvieran interconectados entre sí. Esto permitió que una única salida digital del PLC pudiera controlar el encendido simultáneo de toda la fuente de calor. Esta salida digital se configuró como una señal de modulación por ancho de pulso (PWM), generada mediante un controlador PID implementado en el entorno TIA Portal, empleando la función PID Compact, como se puede ver en la **Figura 27**. Este controlador regula la temperatura de las fuentes de calor al comparar el valor medido con el setpoint ingresado por el usuario y ajustar la señal de control en función del error resultante. Una vez que se establece el valor de referencia y se activa el sistema de calentamiento, el control de temperatura comienza a operar y se activa también el flujo de agua mediante la correspondiente bomba presurizadora.

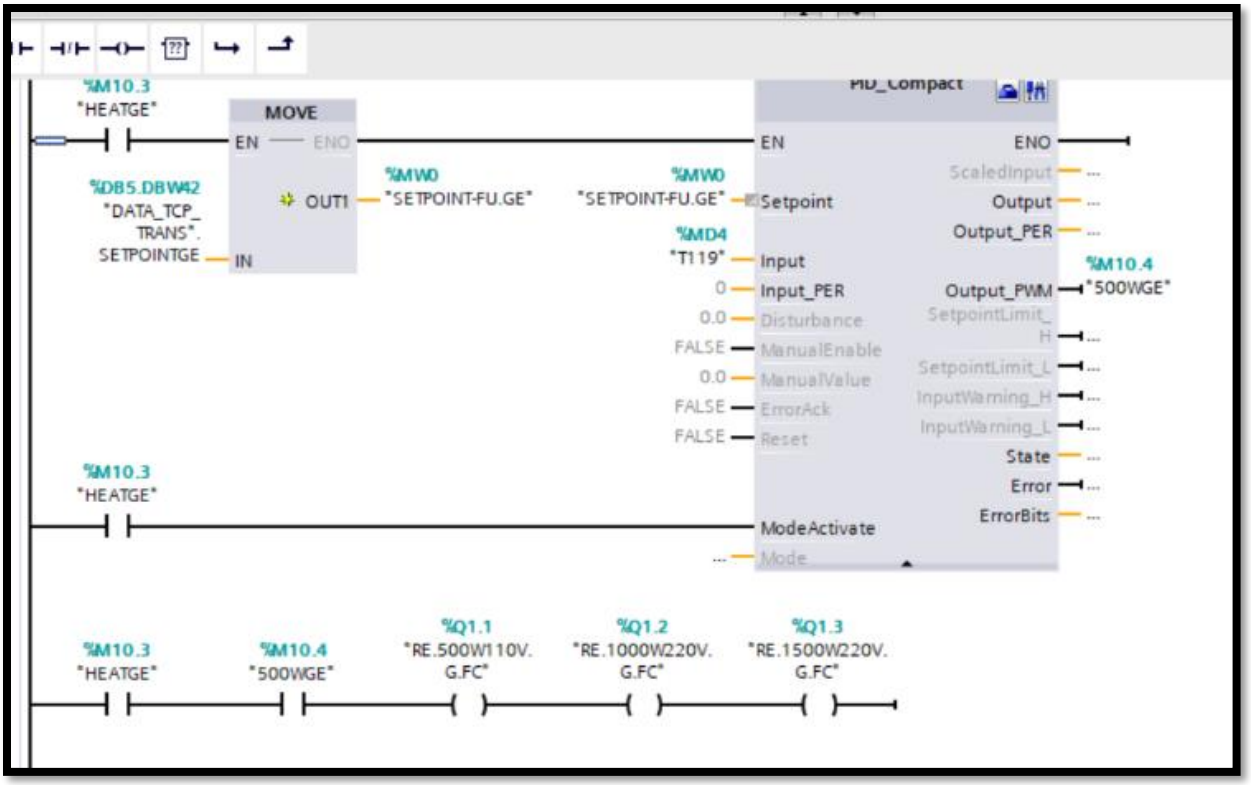


Figura 27. *Programación del bloque PID*

Por otra parte, las MB se integraron al sistema mediante potenciómetros motorizados, lo que permitió establecer posiciones de operación desde la interfaz gráfica y registrar dichas posiciones durante las pruebas. Esta implementación permitió supervisar y ajustar la operación de las MB; sin embargo, no se alcanzó un control automático en lazo cerrado del flujo másico, debido a que no se contó con una señal de medición de caudal funcional y validada para cerrar el lazo de control.

5.4 Mantenimiento del TCA

Búsqueda y reparación de fugas en el equipo.

Se trabajó en el TCA para realizar las pruebas, pero fue necesario buscar y reparar algunas fugas que se produjeron en el equipo durante el periodo vacacional. Este proceso tomó aproximadamente un mes, ya que se detectaron fugas en dos secciones de la tubería y en las perillas del equipo. A continuación, en la **Figura 28** se pueden observar las fotografías del mantenimiento realizado.



Figura 28. *Mantenimiento al TCA*

Mantenimiento de la torre de enfriamiento.
Al correr las pruebas, se detectó que el flujo de la torre de enfriamiento no funcionaba correctamente. Se investigó la causa del fallo, se realizó mantenimiento en la torre de enfriamiento, se identificó un taponamiento en la tubería que impedía el flujo, y se dio mantenimiento al flujómetro de este lazo, lo cual resolvió el problema (**Figura 29**).

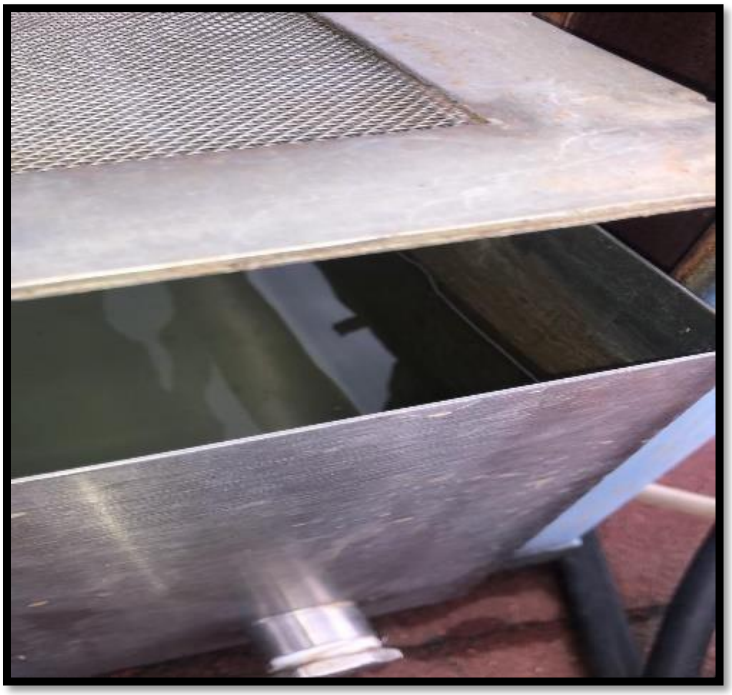


Figura 29. *Mantenimiento a la torre de enfriamiento*

5.5 Validación y pruebas experimentales del PLC y sistema de control

Se llevó a cabo una práctica utilizando un controlador PID en una simulación en Factory IO que se utiliza para hacer proyectos automatizados simulados. El objetivo fue controlar el nivel de un tanque de agua, el cual estaba conectado a una llave de entrada de agua y una válvula de salida para la extracción de agua. El controlador PID se utilizó para regular la válvula de salida, con la finalidad de mantener constante el nivel del líquido, incluso cuando la llave de entrada variaba su apertura. Para esta actividad se utilizó el autoajuste del PID disponible en el software, lo que permitió observar su comportamiento y eficacia.

Posteriormente, se aplicó el controlador PID al control de la temperatura de una garrafa con agua. En esta práctica se ingresó un valor de temperatura deseado (Setpoint) de 80 °C, y mediante un pulso PWM se activó directamente una salida digital del PLC utilizada para controlar un relevador de estado sólido conectado a una resistencia eléctrica de inmersión. Durante las pruebas se observó que la temperatura se mantenía en 80 °C, con un error aproximado de ±1 °C (ver **Figura 30**). Esta prueba se realizó únicamente para comprobar el funcionamiento del PID y considerarlo factible para este proyecto. El resultado demostró la viabilidad del control PID integrado en el software del PLC, desarrollado con el propósito de evaluar su posible aplicación en las fuentes de calor y así reducir el margen de error térmico.



Figura 30. *Temperatura estable*

Pruebas con los lazos de calentamiento.
Se realizaron pruebas funcionales con los lazos de calentamiento del sistema, obteniéndose resultados satisfactorios. Gracias al uso del PLC, fue posible controlar de forma simultánea las tres resistencias de calentamiento de cada fuente mediante un solo controlador PID, lo que permite gestionar 3 kW de potencia. Esto mejora el control del sistema, ya que anteriormente, de forma manual, solo se podía controlar una resistencia de 500 W.

Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas básicas para comprobar que los equipos conectados al PLC respondieran correctamente. Se comprobó que las MB respondían adecuadamente a las órdenes del sistema de control, y que la interfaz gráfica lograba enviar y recibir datos correctamente desde y hacia el PLC. Estas pruebas tuvieron como finalidad validar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico, de control y de comunicación, como preparación para las pruebas experimentales del TCA.

Una vez realizadas las pruebas iniciales para comprobar funcionamiento se realizaron pruebas con el equipo completo, para lo cual el equipo fue llenado con 7 litros de agua y cabe destacar que en este proyecto solo se trabajaron pruebas con agua.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el **Capítulo VI** se presentan los resultados obtenidos en el proyecto relacionados con los controles aplicados a las fuentes de calor del generador y el evaporador. Se incluyen las gráficas correspondientes al comportamiento del control en cada caso, así como su interpretación. También se muestran los resultados de los controles implementados en las MB mediante el potenciómetro motorizado, describiendo los efectos sobre los flujos del equipo. Además, se analiza la mejora en el desempeño del sistema al integrar la interfaz gráfica, el sistema SCADA y el PLC. Los resultados obtenidos en las fuentes de calor constituyen un aspecto clave de este capítulo, ya que demostraron un desempeño favorable.

6.1 Resultados

En una prueba inicial del generador se obtuvo una variación de temperatura de 0.4 °C y se alcanzó la estabilidad después de 57 minutos, como se muestra en la Figura 31. Esta prueba se realizó utilizando únicamente el generador y el absorbedor, las MB de solución diluida y concentrada, y un baño de aceite para retirar calor y favorecer la transferencia térmica entre la fuente de calentamiento del generador y el flujo enviado al absorbedor. El ensayo permitió comprobar que un solo controlador PID podía regular la potencia suministrada por las resistencias de calentamiento, con una potencia total de 3 kW.

Cabe mencionar que esta prueba se realizó primeramente utilizando únicamente el generador y el absorbedor, empleando las MB de solución diluida y concentrada, así como un baño de aceite para retirar el calor y lograr una transferencia térmica entre la fuente de calor del generador y el flujo enviado al absorbedor. Esta prueba inicial se llevó a cabo con el propósito de validar el control implementado y verificar si era posible gestionar adecuadamente una potencia de 3 kW en las resistencias mediante un solo controlador PID. Los resultados permitieron concluir que, efectivamente, el control puede ser realizado de esta manera.

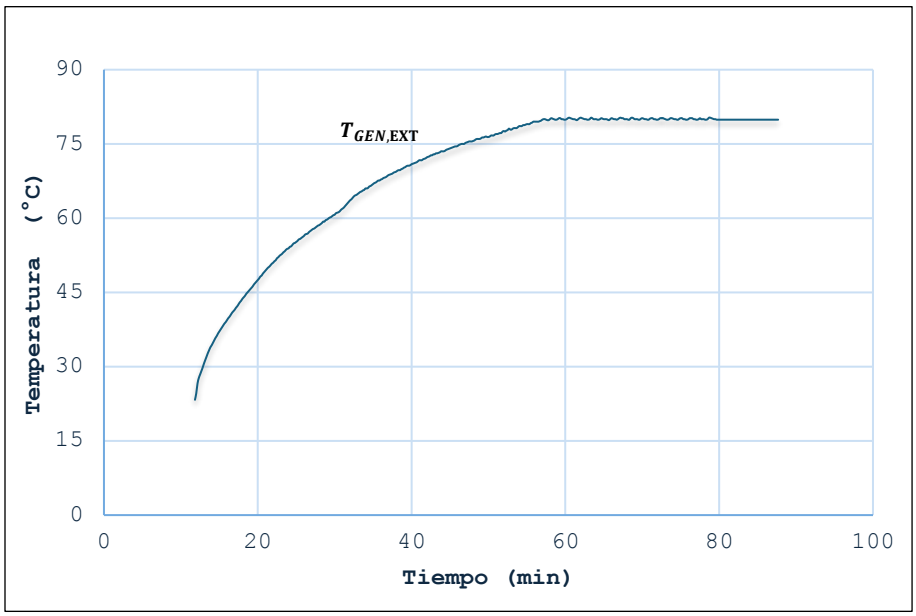


Figura 31. *Control de la fuente de calentamiento del Generador*

El PID calcula una señal de control ($u_{(t)}$) basada en el error ($e(t)$)

$$u(t) = u_{(t)} k_p e_{(t)+k_i} \int_0^t e_{(\tau)}\, d\tau + k_d \frac{de0(t)}{d_t} \qquad (1)$$

La señal $u_{(t)}$ se convierte en un pulso PWM

Una vez realizada la calibración inicial del PID que controla las resistencias de la fuente de calor de generador, se confirmó que el control establecido tenía la capacidad de regular toda la potencia suministrada por las resistencias. Por lo tanto, se llevaron a cabo varias pruebas con el equipo completo para calibrar los controladores de ambas fuentes de calentamiento. Se realizaron ensayos experimentales entre febrero y marzo del año 2025, las cuales se reportan en las siguientes gráficas. Una muestra el comportamiento de la temperatura de calentamiento que ingresa al generador (**Figura 32**), mientras que en la **Figura 33** se observa el comportamiento de la temperatura de calentamiento que ingresa al evaporador.

En los resultados representados en las gráficas, se puede apreciar que el generador presenta mayor inestabilidad térmica que el evaporador. Esto se debe a que, desde las primeras pruebas, el evaporador comenzó a estabilizarse correctamente, mientras que el generador mostró mayor fluctuación. Esta inestabilidad en el generador se explica por la presencia de más lazos de intercambio de calor, ya que en él se mueve la solución hacia el absorbedor y, además, cede vapor al condensador, lo cual complica su estabilidad térmica.

Las pruebas experimentales del sistema de control se realizaron sobre las fuentes de calor del TCA mediante una estrategia de control PID. Se establecieron dos temperaturas de referencia (setpoints): 60 °C y 80 °C. Cada ensayo tuvo una duración de 60 minutos. Durante las pruebas se registró la evolución de la temperatura para evaluar la respuesta del sistema, el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de referencia y la variación térmica durante el periodo de operación.

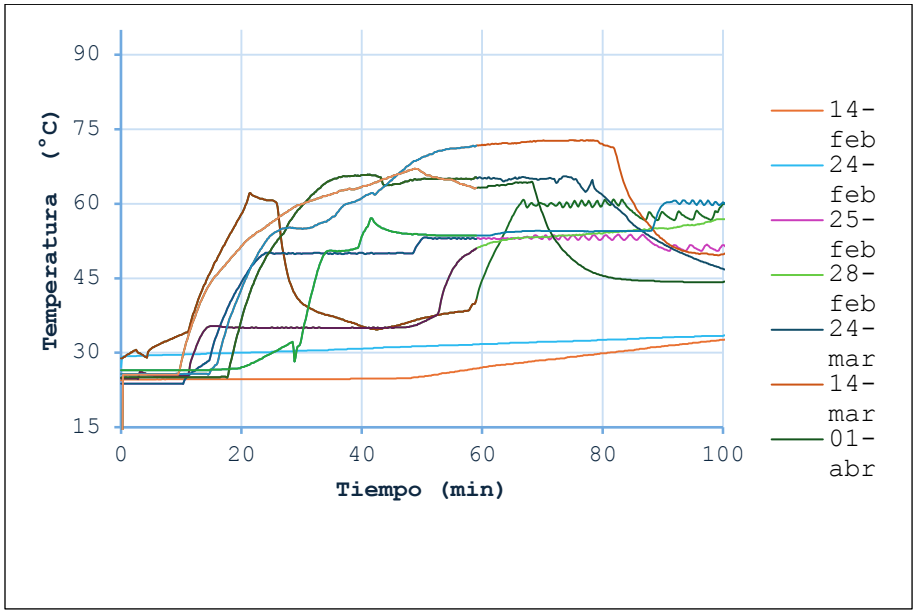


Figura 32. *Pruebas de la fuente de calentamiento del generador en el 2025*

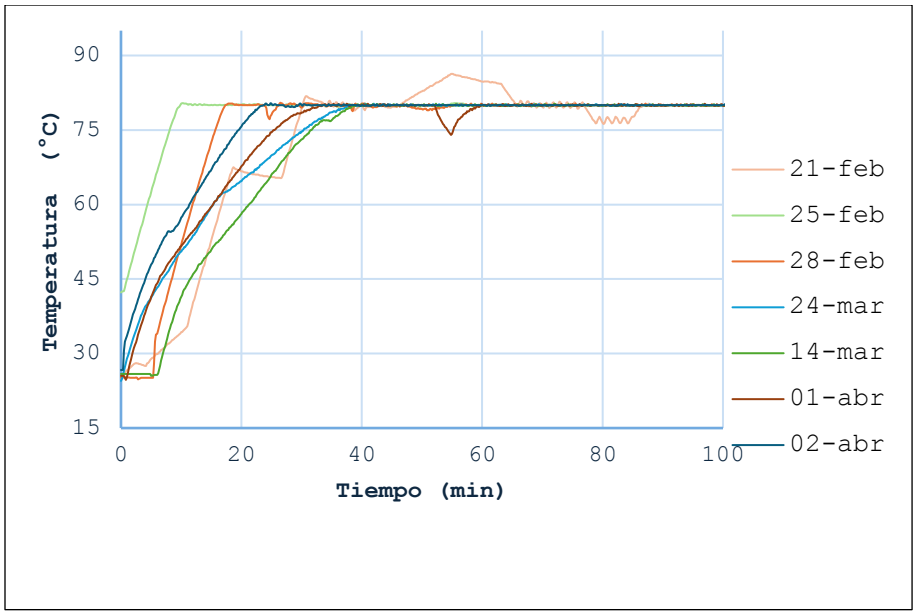


Figura 33. *Control de la fuente de calentamiento del evaporador*

En las pruebas realizadas con el equipo completo se utilizaron 7 litros de agua como fluido de trabajo. En estos ensayos, el evaporador alcanzó el setpoint de 80 °C en 15 minutos, mientras que el generador alcanzó el setpoint de 60 °C en 13 minutos. La respuesta térmica de ambos componentes fue diferente debido a las condiciones de transferencia de calor de cada uno: el evaporador comenzó a recibir agua condensada durante la operación, mientras que el generador transfirió calor desde el inicio hacia el flujo que circula al absorbedor y hacia el vapor generado. La Tabla 2 resume las condiciones y los resultados cuantitativos reportados para esta prueba.

Tabla 2. Condiciones de operación y respuesta térmica del TCA

Componente	**Fluido de prueba**	**Setpoint (°C)**	**Tiempo para alcanzar el setpoint (min)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Duración total (min)**
Generador	Agua	60-80	13	23	100 min
Evaporador	Agua	80	15	23	100min

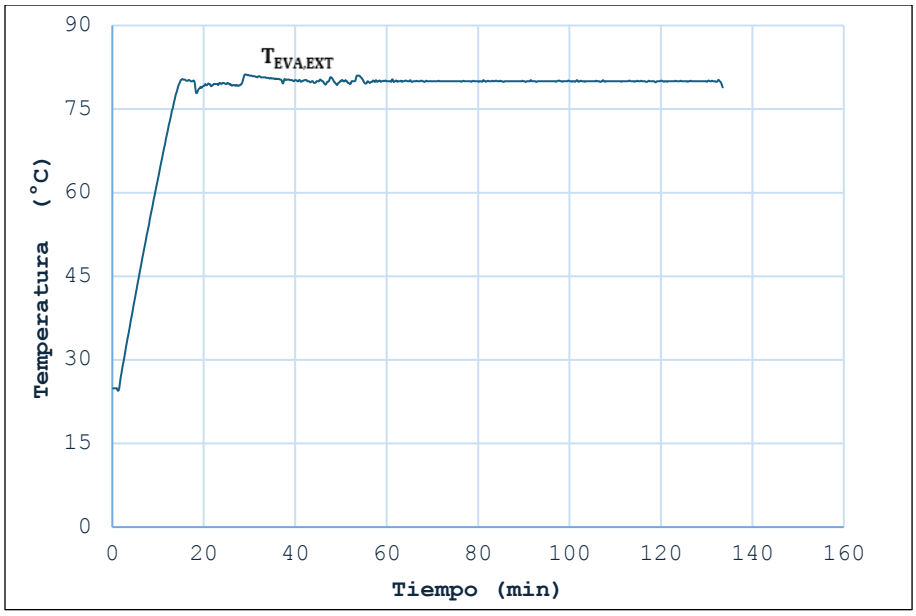


Figura 34. *Control de la fuente de calentamiento del evaporador*

A continuación, en la **Figura 35**, se representa de manera general el comportamiento de las temperaturas externas de los principales componentes del TCA, durante una prueba en estado estable de 100 minutos.

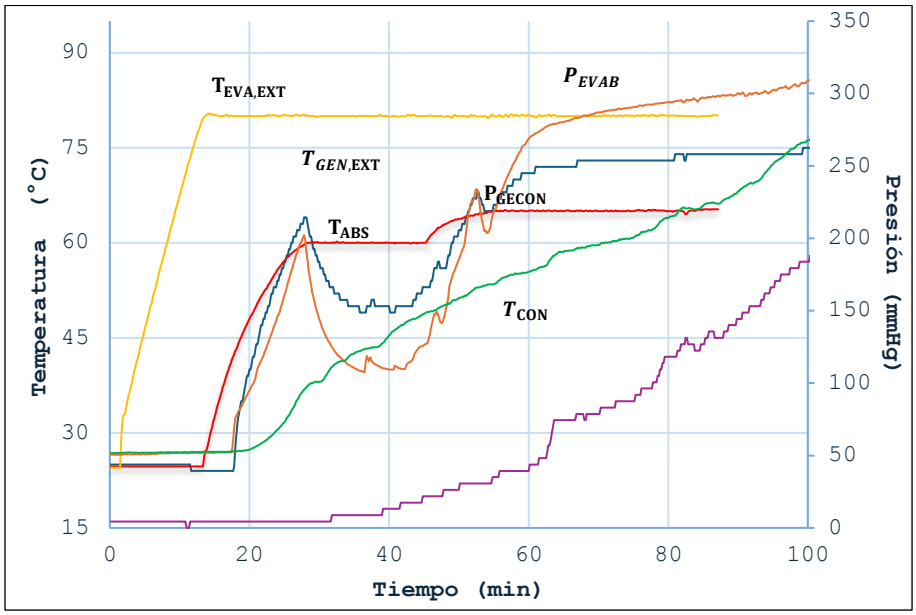


Figura 35. *Comportamiento térmico del TCA*

En los controles de la fuente de calor se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Figura 36,** apreciando que el control aplicado a las resistencias mediante el PLC es altamente eficaz, ya que la temperatura de la fuente de calor del evaporador alcanza

rápidamente el valor deseado y se mantiene dentro de un rango aceptable. Para el generador, la temperatura de calentamiento también se mantiene de forma estable. Se observa un cambio en la curva de temperatura correspondiente debido a una modificación del setpoint de 60 °C a 65 °C. Este ajuste se realizó con el propósito de evaluar su capacidad de respuesta y estabilidad del control. Finalmente, se logró una automatización satisfactoria, lo que contribuye a una mayor precisión y estabilidad en el funcionamiento general del equipo.

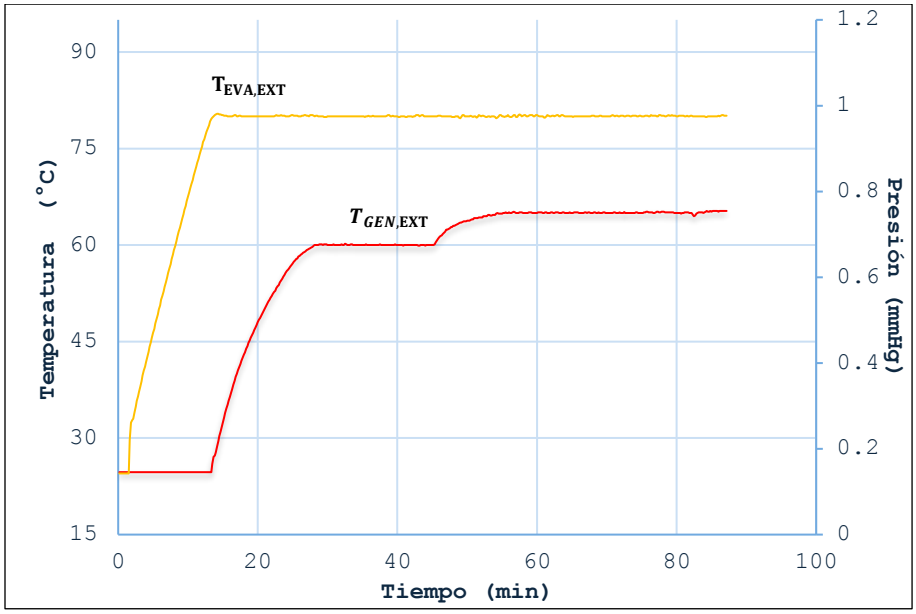


Figura 36. *Comportamiento térmico del TCA*

Se comparó el comportamiento de las fuentes de calentamiento con control PID con los resultados de operación manual reportados por Varela (2022). En las pruebas con control PID, el evaporador alcanzó 80 °C en 15 minutos y el generador alcanzó 60 °C en 13 minutos. En el trabajo de Varela (2022), la estabilización de las fuentes duró poco más de 40 minutos y presentó variaciones de temperatura de entre 1 y 3 °C. En las pruebas con PID, la variación reportada fue de 0.3 a 1 °C. Esta comparación permite describir el comportamiento observado con ambos esquemas; sin embargo, no se afirma que las condiciones experimentales hayan sido idénticas, debido a que corresponden a ensayos realizados en diferentes trabajos y periodos. Por tanto, los valores deben interpretarse como una comparación de referencia y no como una prueba directa bajo condiciones controladas.

Tabla 3. Comparación de los resultados para el control manual y el control PID.

Indicador	**Control manual (Varela, 2022)**	**Control automático (PID)**
Tiempo reportado para alcanzar/obtener estabilidad	Poco más de 40 min	Generador: 13 min; evaporador: 15 min
Variación de temperatura	1 a 3 °C	0.3 a 1 °C
Estrategia de control	Ajuste manual	PID implementado en PLC

Condiciones de comparación	Ensayos de Varela (2022)	Ensayos de este trabajo

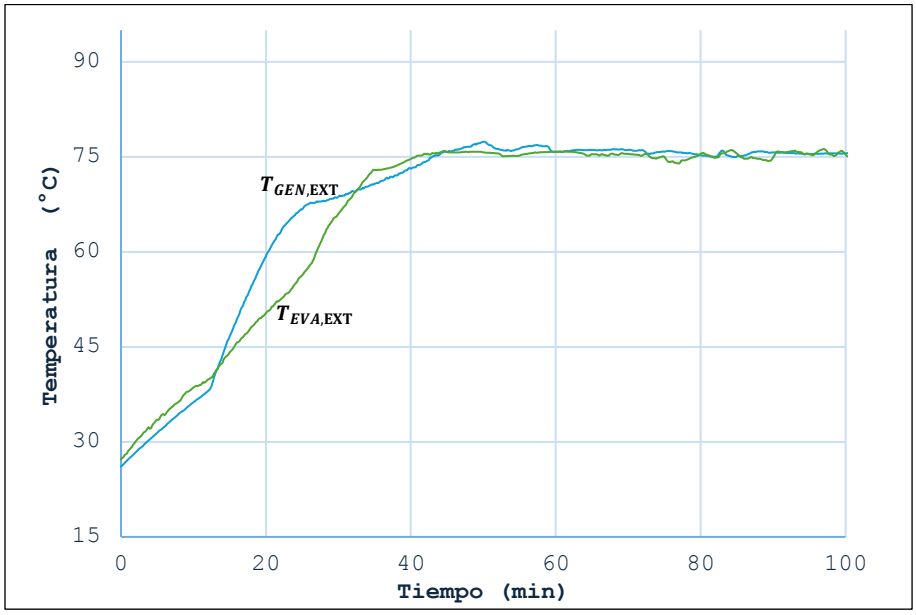


Figura 37. *Fuentes de calentamiento con control manual*

6.2 Resultados del sistema de control implementado

Como resultado final, se logró la automatización de las fuentes de calentamiento del transformador de calor por absorción (TCA), así como la integración parcial del control de los flujos mediante el manejo manual supervisado de las MB a través de la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW.

En cuanto a los flujos, se estableció una conexión funcional entre las MB y el PLC, lo cual permite enviar las posiciones deseadas a los potenciómetros motorizados que controlan las bombas. Esta configuración posibilita encender y controlar cada MB desde la interfaz, así como guardar y visualizar las posiciones de los potenciómetros en tiempo real. El circuito electrónico diseñado recibe las posiciones objetivo desde la interfaz gráfica, las cuales son enviadas al PLC, que a su vez las transmite al controlador de los motores a pasos. Cada motor mueve el potenciómetro a una posición entre 0 y 255 pasos, lo que permite estimar las revoluciones aproximadas de cada MB durante las diferentes etapas del proceso. Gracias a esta implementación, se logró tener una visualización completa del sistema desde la interfaz y un control manual preciso de los flujos, lo que permite integrar las principales variables del TCA dentro de un entorno supervisado y adaptable para pruebas experimentales. Al final, solo se obtuvieron los resultados presentados, ya que durante las pruebas surgieron diversos inconvenientes en el evaporador. Se intentaron resolver, pero el equipo no respondió adecuadamente en el lazo de agua condensada, principalmente porque el sensor correspondiente no funcionaba correctamente. Este trabajo se vio interrumpido en varias ocasiones debido al mantenimiento del TCA, el cual estuvo inactivo por un largo periodo durante la pandemia por COVID-19 iniciada en 2020. Esto limitó significativamente la cantidad de resultados obtenidos. No obstante, a pesar de estas dificultades, se lograron avances

importantes en distintos aspectos del proyecto, lo que permite continuar con el desarrollo del sistema de control del equipo y evidenciar la viabilidad de la arquitectura de supervisión y control implementada. Se demuestra que es posible adaptar un sistema como este para hacerlo más apto y viable en procesos industriales.
Sin embargo, el evaporador aún presenta un problema: acumula agua, lo que impide una evaporación adecuada. Además, cuando se incrementa la presión, la bomba y el flujómetro no funcionan correctamente, lo que disminuye la estabilidad del sistema y genera mayor acumulación de líquido. Por estas razones, no fue posible obtener resultados de un sistema completamente funcional dentro del alcance de este proyecto de investigación.

El sistema cuenta actualmente con una interfaz programable que permite la visualización y manipulación de las principales variables de operación, tales como temperaturas, flujos y presiones. En la **Figura 38** se presentan todas las variables del TCA integradas en el programa desarrollado. Posteriormente, en la **Figura 39** se muestra el comportamiento de algunas de las temperaturas del sistema, mientras que en la **Figura 40** se observa la forma en que las presiones son registradas y graficadas en tiempo real. Estos elementos permiten analizar de manera más clara la operación actual del TCA, facilitando la interpretación de los resultados obtenidos durante su funcionamiento.

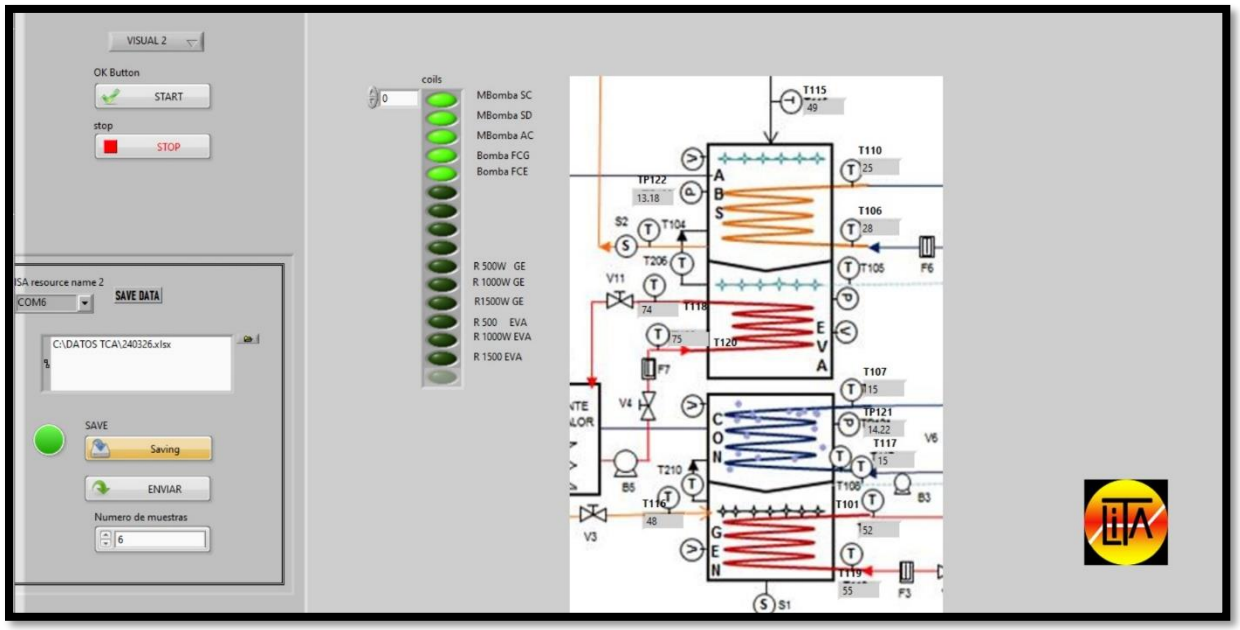


Figura 38. *Interfaz gráfica (Visualización de variables)*

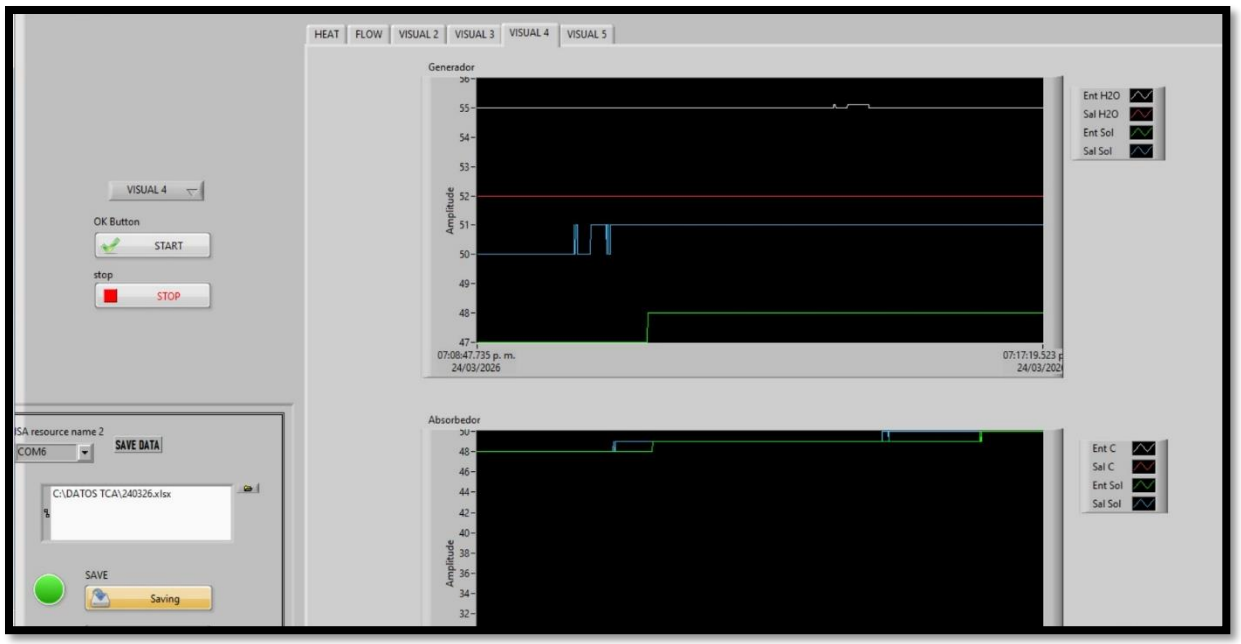


Figura 39. *Interfaz gráfica (Visualización de temperaturas)*

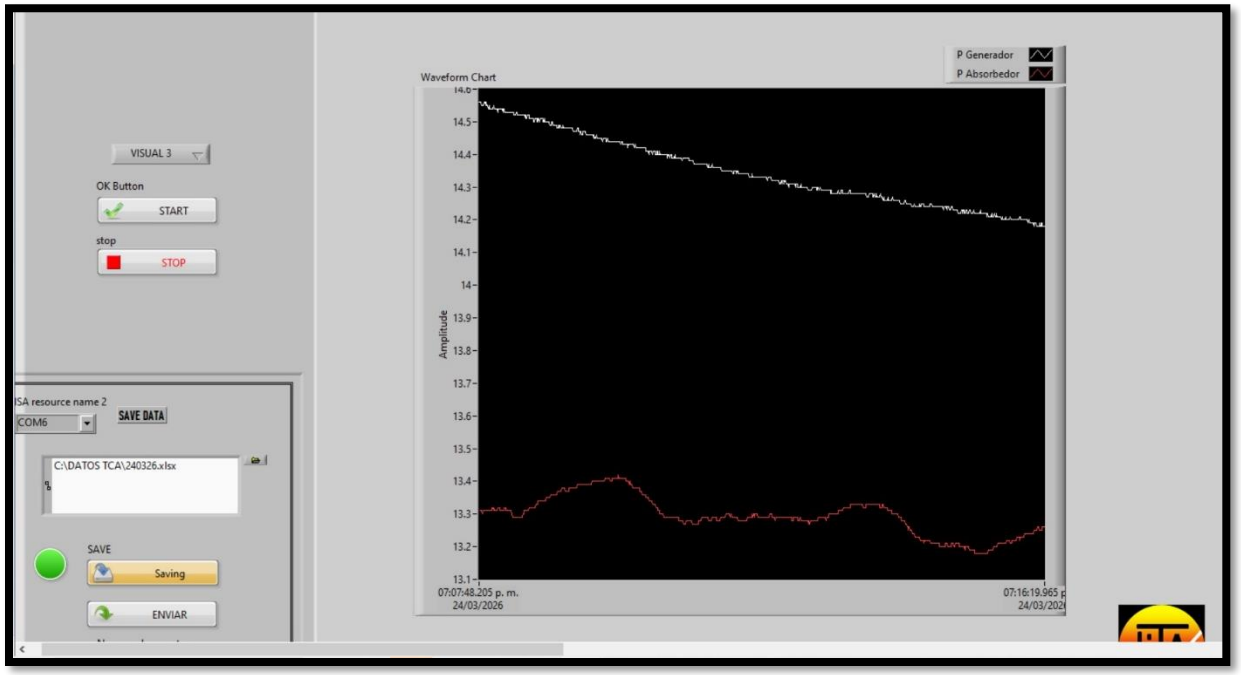


Figura 40. *Interfaz gráfica (Visualización de presiones)*

6.3 Flujos másicos

Las tres MB se integraron al sistema mediante potenciómetros motorizados conectados al PLC. Estos dispositivos reciben las señales de posicionamiento enviadas desde la interfaz gráfica, lo que permite modificar y registrar la posición de cada potenciómetro durante las etapas del proceso. Esta implementación facilita la supervisión y el ajuste de las bombas; no obstante, no representa un control automático en lazo cerrado del flujo másico, ya que no se contó con una señal de medición de caudal funcional para retroalimentar el controlador. Adicionalmente, se realizaron mediciones de flujo en el lazo de agua condensada que se dirige al evaporador. Este resultado constituye una base para trabajos posteriores, en los que será necesario calibrar y validar el instrumento de medición antes de implementar una estrategia de control automático.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este **Capítulo VII** se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del trabajo práctico de investigación; dichos resultados se analizan con base en los objetivos planteados inicialmente, considerando la revisión bibliográfica realizada sobre los TCA y su comparación con otros dispositivos similares. Asimismo, se incluyen recomendaciones relacionadas con el equipo utilizado en este trabajo, así como propuestas de mejora para los sistemas, tomando en cuenta los resultados obtenidos, las condiciones, equipos y materiales disponibles en el laboratorio.

7.1 Conclusiones

El sistema de automatización implementado para el control de las temperaturas de calentamiento permitió regular las fuentes de calor mediante controladores PID, mejorando la respuesta térmica observada durante las pruebas. En una prueba inicial del generador se registró una variación de 0.4 °C y un tiempo de estabilización de 57 minutos. En las pruebas posteriores con el equipo completo, el generador alcanzó 60 °C en 13 minutos y el evaporador alcanzó 80 °C en 15 minutos. Asimismo, la integración de las MB mediante potenciómetros motorizados permitió modificar y registrar sus posiciones desde la interfaz gráfica; sin embargo, no se implementó un control automático en lazo cerrado del flujo másico.

Se logró la programación funcional del PLC S7-1500 utilizando TIA Portal y lenguaje Ladder, permitiendo el control de las fuentes de calentamiento del transformador de calor por absorción. Si bien no se integró un control automático completo de presión y flujo másico, se establecieron las bases para su futura implementación, al conectar los potenciómetros motorizados al PLC, los cuales nos ayudan a monitorear su comportamiento y buscar formas de control.

Se desarrolló exitosamente una interfaz gráfica en LabVIEW, mediante la cual se pudo supervisar el sistema en tiempo real, incluyendo el encendido y control de las MB y bombas presurizadoras, así como el monitoreo de las variables de presión, flujo másico y temperatura. Esta interfaz representa una herramienta útil y funcional para la operación supervisada del equipo. La operación del sistema fue evaluada satisfactoriamente a través de pruebas experimentales, en las cuales se verificó el comportamiento del sistema bajo diferentes pruebas y con la intervención manual del flujo. La interacción entre la interfaz, el PLC y los potenciómetros permitió observar las variaciones de las MB, contribuyendo a una mejor comprensión del comportamiento del equipo durante el proceso.

La integración parcial lograda en esta tesis constituye un avance relevante hacia la automatización completa del TCA. Aunque aún no se controla en lazo cerrado el flujo ni la presión, se establecieron conexiones clave entre el PLC, los actuadores y la interfaz gráfica, lo que permite escalar el sistema hacia un control más preciso y automático en futuras etapas, por lo cual este proyecto da inicio al desarrollo de un sistema de control preciso en futuros trabajos.

7.2 Recomendaciones

1. Implementación de flujómetros digitales. Se recomienda instalar flujómetros digitales en los dos lazos de solución del sistema. Esto permitiría un control más preciso de los flujos, facilitando la automatización del equipo y mejorando la estabilidad del proceso. En caso de utilizar flujómetros analógicos, se sugiere desarrollar un sistema electrónico de lectura que pueda integrarse al sistema de control.

2. Mejora del sistema de medición térmica. Actualmente, la medición de temperatura en las fuentes de calor requieren la activación de la bomba presurizadora, lo cual retrasa la estabilización térmica. Se propone colocar un termopar sumergido dentro de las fuentes de calor para obtener mediciones más rápidas y precisas sin necesidad de activar la circulación.

3. Optimización del evaporador. Se detectaron pérdidas térmicas significativas en el evaporador debido a zonas con vacío. Se recomienda mejorar el aislamiento térmico y considerar la incorporación de un sistema de recuperación del líquido condensado para evitar la apertura frecuente del componente.

4. Desarrollo de estrategias de control para MB. Se sugiere realizar pruebas específicas para evaluar el comportamiento de las MB en función de la presión y la temperatura. Con base en esos resultados, se puede diseñar un sistema de control más robusto que podría integrarse a la interfaz gráfica.

5. Mejora en el sistema de adquisición de datos. Se recomienda utilizar un sistema de adquisición de datos compatible con Modbus TCP, lo que permitiría delegar la adquisición al dispositivo y usar el PLC exclusivamente para el control. Esta medida reduciría costos y aumentaría la capacidad de canales disponibles. En caso de utilizar el adquisidor actual, se sugiere establecer la conexión al PLC mediante RS-232 con el adaptador adecuado, ya que su conexión directa a la interfaz gráfica ha demostrado disminuir el rendimiento del sistema.

6. Instalación de válvula para llenado del sistema. Se recomienda instalar una válvula dedicada al llenado del equipo con solución de trabajo. Esto facilitaría las labores del operador y mejoraría la seguridad y eficiencia del proceso.

Anexo A. Especificaciones técnicas

El sistema cuenta con un adquisidor de datos de la marca Agilent Technologies, modelo 34970A, el cual opera mediante el software BenchLink Data Logger 3. Funciona con una alimentación de 127 V AC y tiene capacidad para tres tarjetas multiplexoras. Integra puertos de comunicación RS-232 y GPIB, y es compatible con sensores tipo RTD, termopares y termistores.

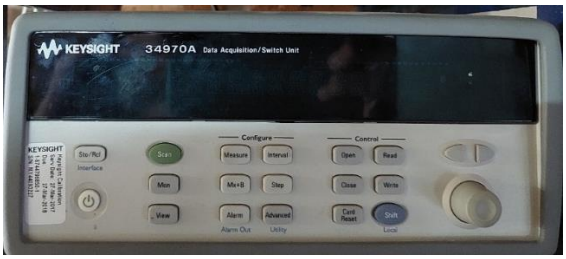


***Figura A1**. Adquisidor de datos AGILENT*

Para el control de vacío, se utiliza una bomba de vacío CHEMSTAR 1400N-01, diseñada para resistir productos químicos. Su flujo de desplazamiento es de 25 L/min de aire libre y alcanza una presión mínima de aproximadamente 1.33×10^{-5} kPa (1×10^{-4}torr). Tiene una potencia aproximada de 0.25 kW, con una velocidad de bombeo de 580 rpm y una capacidad de aceite de 0.62 L. Requiere una alimentación de 115 VAC.



***Figura A2.** Bomba de vacío*

El sistema cuenta con dos bombas presurizadoras:
La bomba B4, de marca GRUNDFOS, modelo Upa-15-90, con una potencia de 0.125 kW, elevación máxima de 15 m, conexiones de succión y descarga de 1/2", y un funcionamiento automático, silencioso y de bajo consumo energético.



Figura A3. *Bomba presurizadora B4*

La bomba B5, de marca Bosch, modelo BOMBA 120W, con una potencia de 0.120 kW, alimentación de 127 V a 60 Hz, con una altura de trabajo de 0.1 kg/cm^2 y conexión a proceso de 1/2" NPT.



Figura A4. *Bomba presurizadora B5*

Para la medición de flujo, se emplean distintos flujómetros. Los flujómetros F1 y F2, de la marca Cole-Parmer, modelo 3229-35, tienen una escala máxima de 150 mm y un rango de flujo de 0.057 a 1.288 L/min. Pueden operar a una temperatura máxima de 121 °C y soportar una presión máxima de 1379 kPa, con una precisión de ±2% a escala completa y una repetitividad de ±0.25%. Su flotador y válvula están fabricados de acero inoxidable 316S, mientras que el tubo es de borosilicato, con conexiones de 1/8 (H).



Figura A5*. Flujómetro analógico*

Los flujómetros F3, F4 y F7, de la marca Blancett, utilizan un monitor de modelo B2800 y una turbina modelo 1100, con una precisión de ±0.1% sobre el 70% superior del rango de medición. Tienen un rango de flujo de 1 a 13 L/min y una temperatura máxima de operación de 177°C, con conexiones de 1/2" NPT.



Figura A6. *Flujómetro digital B2800*

El flujómetro F5, de la marca McMillan, modelo S-114-3, tiene una precisión de ±1% a escala completa y una repetitividad de ±0.2%, con una presión máxima de 4136 kPa y un rango de temperatura de operación de 5 a 55 °C. Está fabricado de acero inoxidable 316 SS y tiene conexiones de 1/8" (H).



Figura A7. *Flujómetro digital McMillan*

El sistema también incorpora un manovacuómetro de la marca Ashcroft, modelo 6801301, con un rango de operación de -101.6 a 208.6 kPa y una temperatura máxima de 115 °C. Tiene conexiones de proceso de 1/4" (M) y un cuerpo de acero inoxidable con relleno de glicerina, lente de policarbonato y un diámetro de 2½"(63mm).



Figura A8. *Manovacuómetro*

Para la alimentación de componentes electrónicos, se utiliza una fuente de poder de la marca BK PRECISION, modelo 1671ª, con una alimentación de 120 VAC y un voltaje de salida de 0-30VCD. Presenta una regulación de línea de voltaje de <0.01% 3mV y cuenta con un display digital.

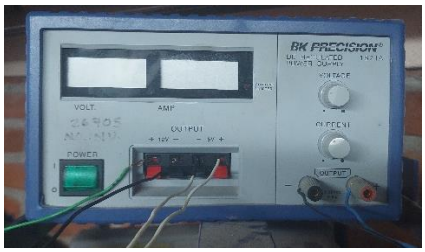


Figura A9. *Fuente de alimentación*

Las micro bombas de desplazamiento positivo que son tres unidades (B1, B2 y B3) de la marca Cole-Parmer, modelo EW-75211-10. Estas tienen una potencia de 74.57 W y pueden operar en un rango de temperatura de -46 a 124°C. Su velocidad es variable entre 50 y 5000rpm, con una presión diferencial de 423.7kPa. Funcionan con una alimentación de 115 VAC con frecuencia de 50/60 Hz, y están fabricadas de acero inoxidable con conexiones de 1/8" NPT (H).



Figura A10. *Microbomba*

Las resistencias eléctricas de inmersión utilizadas en el sistema son del tipo tubular con conexión de tapón de 1" NPT en acero inoxidable. Las resistencias son de 12 cm y diferentes potencias: 500 W a 110 V, 1500 W a 220 V y 1000 W a 220 V.



Figura A11. *Resistencias eléctricas de inmersión*

Se utilizan termopares tipo T, con una precisión de 0.75% y un rango de temperatura de operación de -200 a 350 °C, recubiertos con aluminio.



Figura A12. *Termopar tipo T*

El sistema de enfriamiento se realiza mediante una torre de enfriamiento de la marca ESIN, con una capacidad de enfriamiento de hasta 10 kW. Su estructura es vertical, fabricada en acero al carbón, con una tina de acero inoxidable. Sus dimensiones de 2.66 x 0.72 x 1.05 m y cuenta con un ventilador de 120 VAC.



Figura A13. *Torre de enfriamiento (Varela, 2022)*

Se emplean dos transductores de presión de la marca Cole-Parmer, modelo 6807302, con un rango de operación de 101.35 a 206.84 kPa y una temperatura de -40 a 126 °C. Tiene una precisión de ± 0.13% a escala completa, con una salida de 4 a 20 mA y un voltaje de operación de 12 a 28 VDC. Está fabricado en acero inoxidable y cuenta con una conexión de 1/4" NPT



Figura A14. *Transductor de presión*

El sistema de control cuenta con un PLC Siemens S7-1500, modelo CPU 1511-1PN (6ES7511-1AK00-0AB0), que dispone de 150 KB de memoria de programa y 1 MB de memoria de datos. Este procesador incorpora una interfaz PROFINET IRT con un switch de dos puertos, permitiendo una comunicación rápida y eficiente. Su tiempo de procesamiento es de 60 ns por instrucción y requiere una tarjeta de memoria SIMATIC para su correcto funcionamiento, trabaja a partir de la versión V13 de TIA Portal.



Figura A15. *PLC S7-1500*

Las entradas digitales del sistema son obtenidas por el módulo 6ES7521-1BH10-0AA0, el cual cuenta con 32 canales operando a 24 VDC y un tiempo de respuesta de 3 ms. Este módulo utiliza un conector frontal de 40 pines para su conexión.



Figura A16. *Módulo de entradas digitales*

Las salidas digitales son controladas mediante el módulo 6ES7522-1BH10-0AA0, el cual cuenta con 32 canales operando a 24 VDC y una corriente máxima de 0.5 A por canal, cuenta con el mismo tiempo de respuesta y el mismo tipo de conexión que el módulo de entradas digitales.



Figura A17. *Módulo de salidas digitales*

Para la adquisición de señales analógicas, el sistema emplea el módulo de entradas analógicas 6ES7531-7KF00-0AB0, el cual dispone de 8 canales con rangos configurables de ±10V, 0-10 V, 0-5 V, 1-5 V, 0-20 mA y 4 a 20 mA. Este módulo tiene una resolución de 16 bits y su conexión se realiza mediante un conector frontal de 40 pines.



Figura A18. *Módulo de entradas analógicas*

Las salidas analógicas son administradas por el módulo 6ES7532-5HF00-0AB0, que también cuenta con 8 canales y permite rangos de salida de ±10 V, 0-10 V, 0-20 mA y 4-20 mA, con la misma resolución y tipo de conexión que el módulo de entradas analógicas.



Figura A19. *Módulo de salidas analógicas*

Este conjunto de módulos en el PLC proporciona una plataforma adecuada para el control del sistema, contando un total de 32 entradas digitales y 32 salidas digitales. Además, cuenta con 40 entradas analógicas distribuidas en cinco módulos, lo que facilita la adquisición de señales de diversos sensores analógicos. También cuenta con 16 salidas analógicas en dos módulos. Esta configuración garantiza una gestión integral de señales, facilitando un control preciso de sistemas que requieren el procesamiento de múltiples señales de control.

Cuenta con dos tipos de relevadores de estado sólido monofásicos de 127 V y trifásicos a 220 V. El relevador monofásico es la marca Crydom modelo HD4850, trabaja hasta 480 VAC a 25 A, mientras que la parte de control trabaja de 3 a 32 VDC, es de estado sólido por lo que no tiene desgaste mecánico.



Figura A20. *Relevador monofásico de estado sólido*

El relevador trifásico es de la marca Carlo Gavazzi modelo RZ3A60D2, trabaja hasta 600 VAC hasta 25 A, mientras que la parte de control trabaja de 4 a 32 VDC. Los otros tres relevadores trifásicos son genéricos.



Figura A21. *Relevador trifásico de estado sólido*

Para el circuito de control de las MB se describen los componentes principales a continuación:

Potenciómetro doble de 10 kΩ. El potenciómetro rotativo modelo P2B, es una resistencia variable de doble sección, con dos resistencias aisladas conectadas al mismo eje giratorio de 15 mm de diámetro y 2 cm de altura. Cuenta con 6 pines, tres de una resistencia y otros tres de la otra. Su capacidad de potencia es de 0.25 W, asegurando un funcionamiento eficiente en circuitos de baja potencia.



Figura A22. *Potenciómetro*

El motor a pasos 28BYJ-48 con driver ULN2003 de marca Dip-mecatrónica es un motor paso a paso de bajo voltaje ideal para aplicaciones que requieren un control preciso de movimiento. Trabaja de 5 a 12 VDC. El motor tiene unas dimensiones de 35 mm de largo, 15 mm de ancho y un peso de 40 g. No incluye cable USB y es compatible con microcontroladores para integrarse fácilmente en proyectos de automatización y control.



Figura A23. *Motor a pasos 5V*

Este circuito electrónico cuenta con un Arduino Nano como controlador principal, cuenta con un microcontrolador compacto basado en el ATmega328P, con una frecuencia de reloj de 16 MHz. Cuenta con 14 pines digitales (PWM), 8 entradas analógicas y comunicación UART, I2C y SPI. Su alimentación puede ser vía USB mini-B o externa de 5 V. Posee dimensiones de 45 x 18 mm, facilitando su integración en sistemas compactos.



Figura A24. *Arduino Nano*

El display LCD 16X2 tiene luz azul de fondo y muestra 16 caracteres en 2 líneas. Funciona con 5 VDC y es compatible con controladores como el HD44780. Ideal para proyectos de automatización y visualización de datos.



Figura A25. *LCD de 16 segmentos*

Anexo B. Diagramas de control

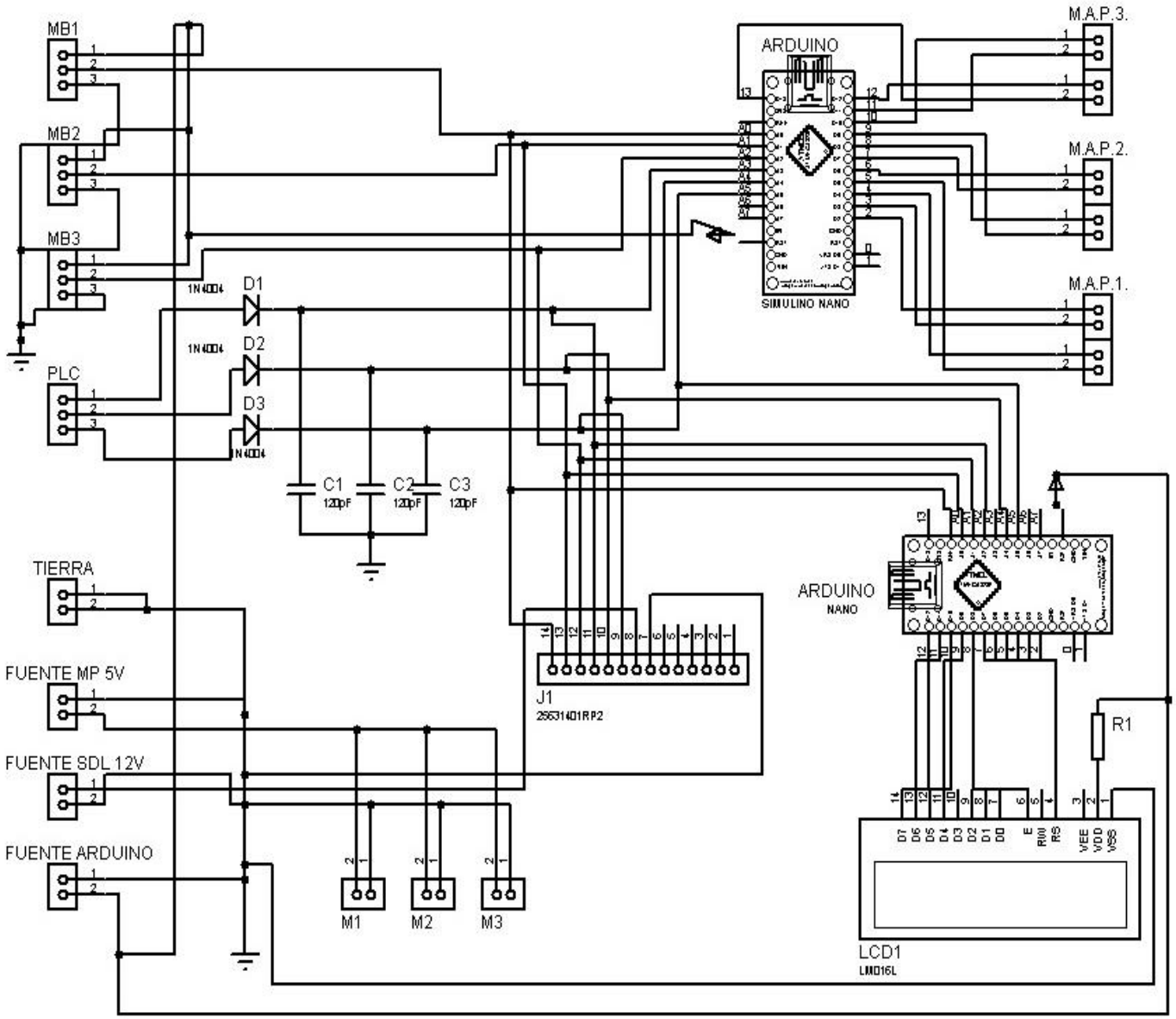


Figura B1. *Circuito electrónico potenciómetro motorizado*

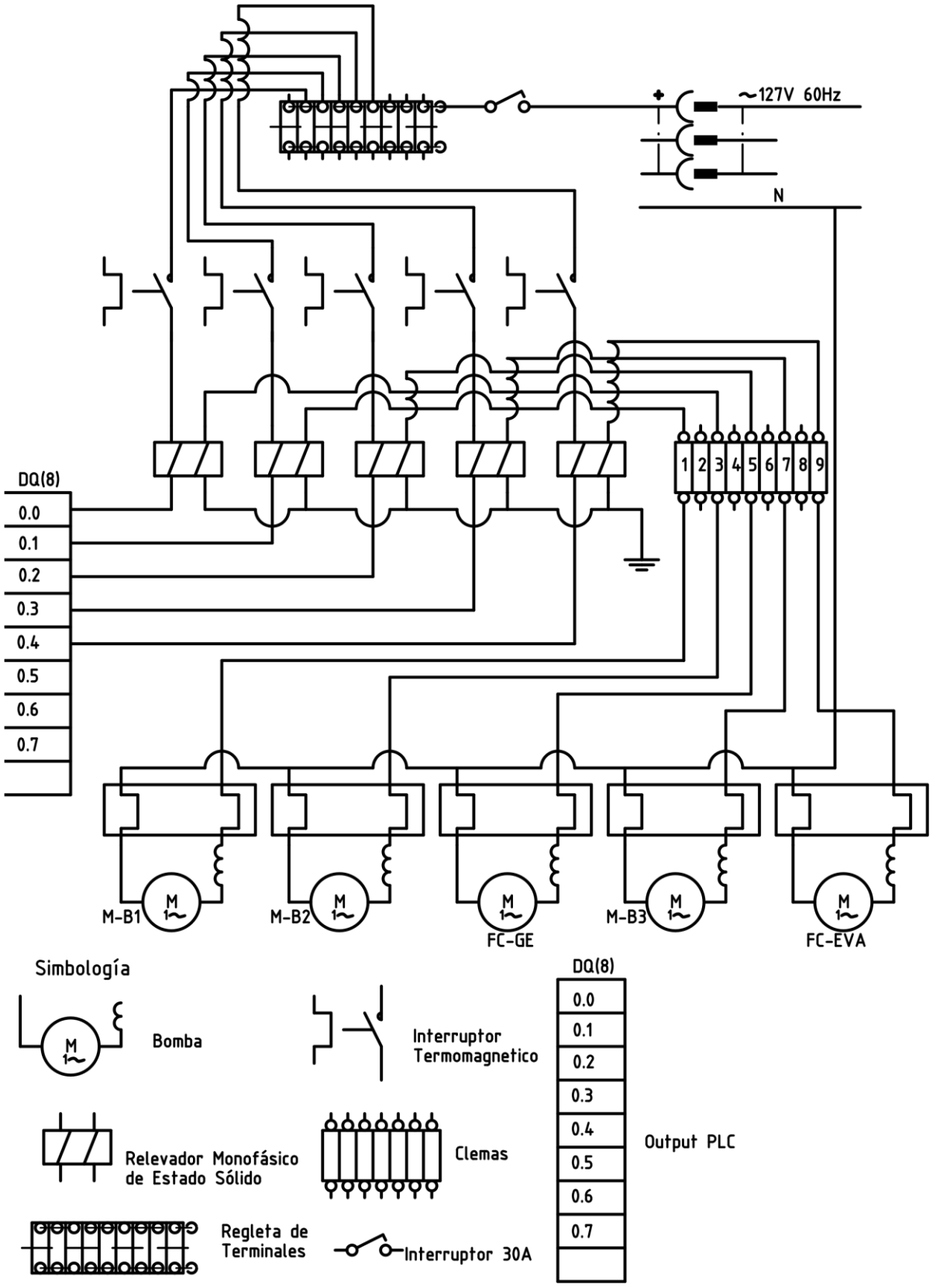


Figura B2. *Diagrama eléctrico bombas*

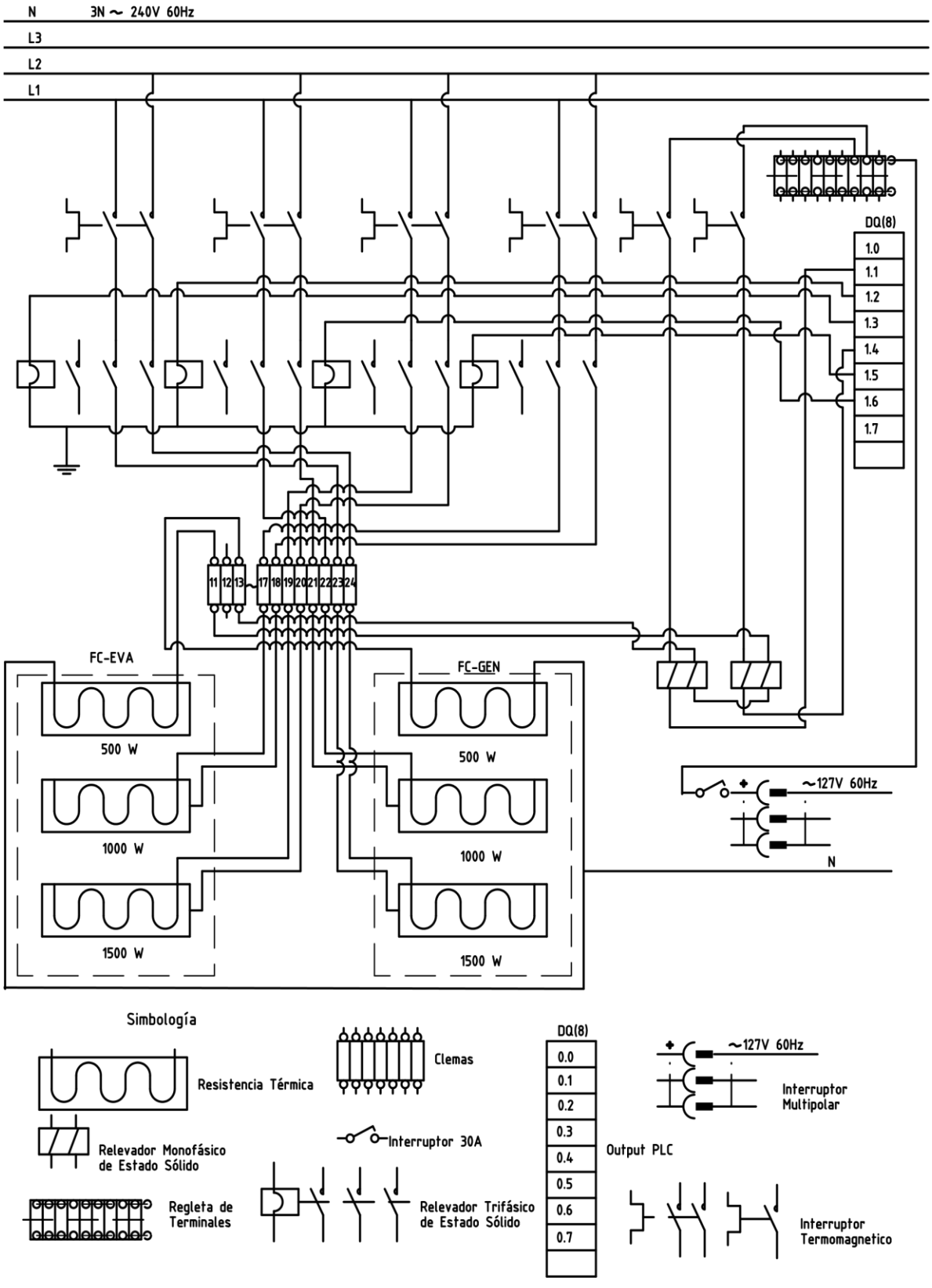


***Figura B3**. Diagrama eléctrico de resistencias de inmersión*

PRODUCCIÓN ACADÉMICA

A continuación, se incluyen los documentos correspondientes a los trabajos académicos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto.

AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia
en Ingeniería Química (AMIDIQ)

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Jorge Carbajal Carbajal, Armando Huicochea Rodríguez, Jorge Arturo Sandoval Espino, Tabai Torres Díaz, Luis López Pérez

Por la presentación del trabajo

CONTROL DE VARIABLES CRÍTICAS DE UN TRANSFORMADOR DE CALOR POR ABSORCIÓN

En el área de TERMODINÁMICA, en la modalidad CARTEL

ID: 450

Presentado en el XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ, La Ingeniería Química ante los desafíos ambientales y energéticos, realizado en San José del Cabo, Baja California Sur, México, del 13 al 16 de mayo de 2025.

Dra Nelly Ramírez Corona
Presidenta
Consejo Directivo de la AMIDIQ
y Comite Organizador

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia
Presidente
Comité Técnico

XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ

La Ingeniería Química ante los desafíos ambientales y energéticos

San José del Cabo, Baja California Sur, México. 13 al 16 de mayo de 2025

AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

La Academia Mexicana de Investigación y Docencia
en Ingeniería Química (AMIDIQ)

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Isaac Justine Canela Sánchez, Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, Abisai Acevedo Quiroz, Armando Huicochea Rodriguez, David Juárez Romero, Iván Antonio Juárez Trujillo, Jorge Carbajal Carbajal

Por la presentación del trabajo

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN EVAPORADOR DE PELÍCULA DESCENDENTE PARA LA EVALUACIÓN DE SU RENDIMIENTO

En el área de INGENIERÍA DE PROCESOS, SIMULACIÓN Y CONTROL, en la modalidad ORAL

ID: 529

Presentado en el XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ, La Ingeniería Química ante los desafíos ambientales y energéticos, realizado en San José del Cabo, Baja California Sur, México, del 13 al 16 de mayo de 2025.

Dra Nelly Ramírez Corona
Presidenta
Consejo Directivo de la AMIDIQ
y Comite Organizador

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia
Presidente
Comité Técnico

XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ

La Ingeniería Química ante los desafíos ambientales y energéticos

San José del Cabo, Baja California Sur, México. 13 al 16 de mayo de 2025

Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (2025) 47:222
https://doi.org/10.1007/s40430-025-05518-9

TECHNICAL PAPER

Quick stabilization in absorption heat transformer start-up by identifying critical thermal variables

Luis Adrián López-Pérez[1] · Tabai Torres-Díaz[1] · Jorge Carbajal-Carbajal[1] · Sandro Guadalupe Pérez[1] · Armando Huicochea[1]

Received: 12 July 2024 / Accepted: 7 March 2025 / Published online: 8 April 2025
© The Author(s), under exclusive licence to The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2025

Abstract
Absorption heat transformers (AHTs) are a promising technology for industrial waste heat recovery, enhancing energy efficiency and sustainability. However, achieving quick start-up and stable operation remains challenging due to complex thermal interdependencies and limited understanding of transient dynamics. This study proposes a methodology to reduce AHT stabilization time by identifying critical thermal variables in transient-state conditions. The approach combines correlation and significance analyses to determine variables most influential on output temperatures across main components, such as heat source/cooling water temperatures, pressures, mass flow rates, and solution concentrations. The methodology was tested using experimental data from a 2-kW AHT prototype, supported by an artificial neural network (AHT-ANN) model to simulate stabilization time reductions. Results identified three critical transient variables: desorber heating water input temperature, condenser cooling water input temperature, and system low pressure. Strategic management of these parameters reduced start-up stabilization time by up to 36.1%. Additionally, the model's coefficient of performance aligned closely with experimental values (discrepancies < 0.0625), validating its accuracy and consistency with baseline energy metrics. This methodology offers a practical framework to minimize start-up delays in AHT systems while maintaining adaptability across configurations and operating conditions. By advancing insights into transient behavior, the study paves the way for improved operational efficiency and broader industrial adoption of AHTs in waste heat recovery.

Keywords Absorption heat transformer · Artificial neural network · Energy efficiency · Industrial waste heat recovery · Modeling and simulation

List of symbols

AHT	Absorption heat transformer
ANN	Artificial neural network
ANNI	Artificial neural network inverse
b_1	Vector bias in the hidden layer
b_2	Vector bias in the output layer
COP	Coefficient of performance, dimensionless
CART	Classification and regression tree algorithm
Des/Con	Desorber/condenser
d_i	Difference between the i-th observations of x and y, *dimensionless*
Eva/Abs	Evaporator/absorber
GTL	Gross temperature lift, °C
k	k-Value for k-fold cross-validation
LOGSIG	Logarithm of the sigmoid transfer function
$\dot{m}$	Mass flow rate, kg/s
MAE	Mean absolute error, °C
n	Sample size, dimensionless
P6	High-pressure line, kPa
PURELIN	Purely linear transfer function
VI	Variable importance, dimensionless
Q	Heat flux rate, kW
R^2	Coefficient of determination, dimensionless
r_s	Spearman's Rank correlation coefficient, dimensionless
SHX	Solution heat exchanger
T	Temperature, °C

Technical Editor: Monica Carvalho.

✉ Armando Huicochea
huico_chea@uaem.mx

[1] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, C. P. 62209 Cuernavaca, Mor, México

Applied Thermal Engineering 268 (2025) 125894



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apthermeng



Research Paper

Experimental evaluation of an absorption heat transformer with Carrol/H_2O to obtain freshwater

T. Torres-Díaz [a], L. López-Pérez [a], D. Juárez-Romero [a], J. Delgado-Gonzaga [b], J. Carbajal-Carbajal [a], A. Huicochea [a,*]

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) Universidad Autónoma del Estado (UAEM) de Morelos Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa Cuernavaca Morelos México

[b] Instituto de Energías Renovables Universidad Nacional Autónoma de México Temixco Morelos México

ARTICLE INFO

Keywords:
Energy saving
Absorption heat transformer
Freshwater
Carrol/H_2O
Single stage evaporation

ABSTRACT

The thermodynamic and transport characteristics of the working solution are determinants in maximizing the energy and thermal performance of an absorption heat transformer. This work shows the experimental results of an absorption heat transformer with Carrol/H_2O to obtain fresh water due to its high solubility from 50 to 80 % and low risk of crystallization. Experimental evaluation is carried out by applying the first law of thermodynamics. Energy performance, heat recovery, total specific thermal energy consumption, and freshwater quantity at different evaporation temperatures and concentrations are evaluated. The maximum energy yield is 0.330, the gross temperature lift is 30.0 °C, and the maximum amount of fresh water is 800 mL/h. Also, these experimental results are compared with already published results on the same heat transformer with same configuration using LiBr/H_2O and LiBr + LiI + $LiNO_3$ + LiCl/H_2O under similar operating parameters to define the best working solution according to the required need. The best energy yield of 0.380 was achieved with LiBr + LiI + $LiNO_3$ + LiCl/H_2O. However, the lowest freshwater yield of 348 mL/h was obtained with this working pair. The lowest gross temperature lifts were 21.0 °C and 22.7 °C with LiBr + LiI + $LiNO_3$ + LiCl/H_2O and LiBr/H_2O, respectively.

1. Introduction

The theoretical and experimental studies of Absorption Heat Transformers (AHT) have increased since the end of the last century due to their capacity to recover residual heat, which is produced by the factories [24]. However, the lack of technical knowledge and the absence of records of AHT's have questioned their viability and reliability. There are 48 AHT's installed with a capacity of 134 MW, and 61 % have been mainly used in the chemical factory [12]. The single AHT development has been basic to understand the advanced AHT. The basic AHT has four physical processes (desorption, condensation, evaporation, and absorption) which are carried out in four heat exchangers connected in series. All the processes need a hot or cold line to interchange heat with the working solution (absorber and refrigerant) to develop a thermodynamic cycle. The aim of an AHT is to upgrade the thermal level from a heat quantity. The useful heat with a temperature higher than 100 °C can be used for another process, obtaining at least two applications using one activation source.

1.1. Working solutions in absorption heat transformers

The physical, chemical and thermodynamic properties of the absorbent and refrigerant (working solution) determine the performance of the AHT from the viewpoint of energetic and thermal. For the case of refrigerant, a high latent heat reduces the size and cost of the equipment, while a low vapor pressure generates cavitation, and a high operating pressure requires more resistant and expensive equipment. The absorbent, it must have a high saturation temperature and low vapor pressure to avoid a rectifier, and to reduce the initial investment and maintenance. Also, its high solubility allows working in a wide range to reduce the risk of crystallization. The theoretical proposals of working solutions for absorption equipment were abundant at the end of the last century. Different thermodynamic design data for AHT were presented such as LiBr/H_2O [10], Carrol/H_2O [4], Ammonia/H_2O [32, 25], [25], Lithium Chloride/H_2O [13], Ammonia/Lithium Nitrate [9], Lithium Iodide/H_2O [21], LiBr/H_2O, R21-DMF, R22-DMF and R22-DMETEG [18], sulphuric acid/H_2O [7], between other. A single-stage AHT using these working solutions can reach a Coefficient Of Performance (*COP*) of up to 0.5 and a Gross Temperature Lift (*GTL*) of

* Corresponding author.
E-mail address: huico_chea@uaem.mx (A. Huicochea).

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125894
Received 3 October 2024; Received in revised form 23 January 2025; Accepted 9 February 2025
Available online 11 February 2025
1359-4311/© 2025 Published by Elsevier Ltd.

REFERENCIAS

Aktaş, M., Ceylan, İ., & Gürel, A. E. (2014). Testing of a condensation-type heat pump system for low-temperature drying applications. *International Journal of Food Engineering, 10*(3), 521–531. https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0124

Balderas-Zapata, J., Zapata-Torres, M., Chalé-Lara, F., & Peraza-Vázquez, H. (2008). Automatización del control térmico de un sistema de evaporación de películas delgadas utilizando LabVIEW. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12*(1), 41–50.

Balcells, J., Romeral, J. L., & Martínez, J. L. R. (1997). *Autómatas programables*. Marcombo.

Bernal Zambrano, M. A., Guzmán Chávez, A. D., & Vargas Rodríguez, E. (2017). Control de temperatura de materiales usando enfriadores termoeléctricos. *Jóvenes en la Ciencia, 2*(1), 1806–1810.

Bryan, L. A., & Bryan, E. A. (1997). Programmable controllers: Theory and implementation (2nd ed.). Industrial Text Company.

Buratto, W. G., Muniz, R. N., Nied, A., de Oliveira Barros, C. F., Cardoso, R., & González, G. V. (2024). A review of automation and sensors: Parameter control of thermal treatments for electrical power generation. *Sensors, 24*(967). https://doi.org/10.3390/s24030967

Cudok, F., Giannetti, N., Ciganda, J. L. C., Aoyama, J., Babu, P., Coronas, A., Fujii, T., Inoue, N., Saito, K., Yamaguchi, S., & Ziegler, F. (2021). Absorption heat transformer—State-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141*, 110757. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110757

Donnellan, P., Cronin, K., & Byrne, E. (2015). Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42*, 1290–1304. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.002

Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57*, 1568–1579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192

Gómez, J. (2009). Diseño de un control de temperatura con PLC y sistema de supervisión SCADA vía Ethernet. *Revista Politécnica, 5*(9), 65–71. Recuperado de https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/143

Gomri, R. (2010). Thermal seawater desalination: Possibilities of using single effect and double effect absorption heat transformer systems. *Desalination, 253*(1–3), 112–118. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.023

Goyal, A., Staedter, M. A., & Garimella, S. (2019). A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps. *International Journal of Refrigeration, 97*, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026

Helvacı, H. U., & Khan, Z. A. (2016). Experimental study of thermodynamic assessment of a small-scale solar thermal system. *Energy Conversion and Management, 117*, 56–76. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.050

Horuz, I., & Kurt, B. (2010). Absorption heat transformers and an industrial application. *Renewable Energy, 35*(10), 2175–2181. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.025

Huicochea, A., & Siqueiros, J. (2009). Increase of COP for an experimental heat transformer using a water purification system. *Desalination and Water Treatment, 12*(1–3), 305–312. https://doi.org/10.5004/dwt.2009.955

Jing, Y., Liu, F., Sui, J., & Liu, T. (2020). A novel method and operation strategy for the improved performance of an absorption heat transformer. *Applied Thermal Engineering, 178*, 115548. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115548

Liu, F., Sui, J., Liu, H., & Jin, H. (2017). Experimental studies on a direct-steam-generation absorption heat transformer built with vertical falling-film heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science, 83*, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.11.033

López-Pérez, L. A., Torres-Díaz, T., Pérez Grajales, S. G., Flores Prieto, J. J., Juárez Romero, D., Hernández Pérez, J. A., & Huicochea, A. (2024). *Solar water heating system with absorption heat transformer for annual continuous water heating*. Processes, 12, 1650. https://doi.org/10.3390/pr12081650

Ma, X., Chen, J., Li, S., Sha, Q., Liang, A., Li, W., Zhang, J., Zheng, G., & Feng, Z. (2003). Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant. *Applied Thermal Engineering, 23*(7), 797–806. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00011-5

García Moreno, E. (2001). *Automatización de procesos industriales*. Alfaomega.

Moreno Garrido, D. (2021). *Proyecto de automatización coordinada y remota de dos prototipos de laboratorio mediante periferia distribuida con autómata Siemens S7 1500, desarrollo de SCADA en WinCC RT y de aplicación HMI* [Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València]. RiuNet. https://riunet.upv.es/bitstream/10251/174612/1/Moreno%20-%20Proyecto%20de%20automatizacion%20coordinada%20y%20remota%20de%20dos%20prototipos%20de%20laboratorio%20mediante....pdf

Palenzuela, P., Roca, L., Zaragoza, G., Alarcón-Padilla, D. C., García-Rodríguez, L., & De La Calle, A. (2014). Operational improvements to increase the efficiency of an

absorption heat pump connected to a multi-effect distillation unit. *Applied Thermal Engineering, 63*(1), 84–96. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.050

Parham, K., Khamooshi, M., Tematio, D. B. K., Yari, M., & Atikol, U. (2014). Absorption heat transformers – A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews, 34*, 430–452. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.036

Petruzella, F. D. (2017). *Programmable logic controllers* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
Rivera, W., Best, R., Cardoso, M. J., & Romero, R. J. (2015). A review of absorption heat transformers. *Applied Thermal Engineering, 91*, 654–670. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.021
Sivaranjani, S., Velmurugan, S., Kathiresan, K., Karthik, M., Gunapriya, B., Gokul, C., & Suresh, M. (2020). *Materials Today: Proceedings, 45(2), 2306–2312*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.559

Staudt, S., Unterberger, V., Muschick, D., Gölles, M., Horn, M., Wernhart, M., & Rieberer, R. (2023). MIMO state feedback control for redundantly actuated LiBr/H_2O absorption heat pumping devices. *Control Engineering Practice, 140*, 105661. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105661

Varela, K. (2016). *Intercambiadores de calor helicoidal para un transformador de calor por absorción.* Tesis Maestría en CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Varela, K. (2022). *Estudio experimental de un transformador de calor por absorción con intercambiadores helicoidales múltiples anidados.* Tesis Doctoral en CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Wang, H., Li, H., Bu, X., & Wang, L. (2017). Effects of the generator and evaporator temperature differences on a double absorption heat transformer. *Energy Conversion and Management, 138*, 12–21. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.076

Wutthithanyawat, C., & Srisiriwat, N. (2014). Process control virtual laboratory: Temperature control based on LabVIEW. *Applied Mechanics and Materials, 619*, 303–308. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.619.303

Xu, Y.-J., Zhang, S.-J., & Xiao, Y.-H. (2016). Modeling the dynamic simulation and control of a single effect LiBr–H2O absorption chiller. Applied Thermal Engineering, 107, 1183–1191. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.043

Yang, S., Yang, S., Wang, Y., & Qian, Y. (2017). Low-grade waste heat recovery with a novel cascade absorption heat transformer. *Energy, 130*, 461–472. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.117

Yari, M. (2012). A novel cogeneration cycle based on a recompression supercritical carbon dioxide cycle. *International Journal of Exergy, 10*(3), 346. https://doi.org/10.1504/IJEX.2012.046815

Cuernavaca, Morelos, 14 de octubre de 2026.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Control de variables críticas de un transformador de calor por absorción que presenta el alumno **Jorge Carbajal Carbajal**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.** .

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO.**

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
DR. JOSÉ ANTONIO MARBAN SALGADO
DR. TABAI TORRES DÍAZ
DR. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ

Se adiciona efirma UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ | Fecha:2026-10-19 11:55:22 | FIRMANTE

Sqa/zHy4NAlSz24Hai81w86BTeL4DQ456e3AlEblzLnBcPD+pW4y6/pC6FsH8BicznpAlKZzytHdC3PJj7cvZhewvGEH5iohs3dTRaB5ONL7VJUBuz0mcP1A3Xmv3PFvUc2ROsGa
CdBN7jOLepk0E41FmLTSAkf9S9ZXsCpJAllcrVZqkKbB7aKceIRIJSfM6OLppjHGDp42/sFwvWlw+KXx2G5drtsRaT3ZIDkG1S6iFw2gUi7+Ve1CXGp/iGjEOYzncQoMTSD6p4/ppZ
yaIl4LBYOKeWPIftb575/tBE3/Z5uo+NsFr2AAgmazOba1pXHtWJDdrf4u0hEmvzB1NQ==

JOSE ALFREDO HERNANDEZ PEREZ | Fecha:2026-10-19 12:03:11 | FIRMANTE

JKZRf6grFL1KDP6b/wfkigPUAxShH5P32klX2kj4N+wo8J7LBJUcX2qa0aASiPzeeF493nlmr6H+brMPClYw0NCpX3BH94j/YCayYUkZXXe7lGYyd6AU88jGKrS2KWLKWmiysqJTo
zug1R19chRxp4LoyzoGDh882gwqVryvctUNF+bf08+VP//ji5z9P35jJbce2UM4epWoIFz16/LzoikkW6iOlyAZ2OVonACVa0Q65MqKC/1LctP3G+JfyqosMxsprAl4y9BJsNfcQeEkZOp
plRI6WraTwM3csNwjetnVpBOWclQ98N+K/jcUPfAF5yiQF3jfnlEWI8GdSFNHrg==

JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2026-10-19 15:50:31 | FIRMANTE

JHrplfPELo/4NvJlEPGoEKClhogP5sDBCZLIzcGC1NGeo7G8jW/ekQcUtadxEubHl7uuc7eGekupQcSaH86bBy/d0Vo4lyuug+3vCixBXJyqSjh0Q9q22CO7WFoj4SyorSkMnTOj7k9
3SG6rQ6/Pyjd6NMkrIA0PiM1TeDv/WC4XzhH3CpMQjfLvVXwXoj/efRcu2GpBLMw3to/VvTAkEEwAgl2QCFjjFZrxUTTU9orpk9Y0NOvmGhHWHmA05fsIkCmeWZHe+Yg0HOhCM
qOdC7ZK013ZbKKeM4wQeBoPA+BbfA6M1c9PnPfRtDO0N4jv5FHed8LCap8miTGtZCCsSg==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2026-10-21 10:37:39 | FIRMANTE

BG4AsoNpovQwGkLz2hxHgKJvbj6jmUT44SRbm591HMmYnUu7ecVDMkYzWD/+Q2lCnGNNnt9CPEKFxb2K9NNqqqEzlUHFWZqbFtUowR7659TLQw0/2/raA9DUzFGhtMXIdx/
nyfOPx62DS5RqUeZntElFiFezNj/Lf0OlyiOFAq7I64wci+t7Zo7W6+bIoXtwXfoJ1ZriI/XE3/rzhSznftNL8TpoLEEj0ScgMA+C8pwCO6giLHUFhNXeqrXtqbW6cuJ8uflVAz+6/Z9J5hMy
8jFPtEkS6rReRum69xl8FgCZWNWqOCc6CIZPdCH9gyptni+krgKVM/niOhjnY0gqow==

TABAI TORRES DIAZ | Fecha:2026-10-29 18:51:19 | FIRMANTE

CnMz2/L16eywpv30FA/25WqsV6YhFdFVr5dWGFIF7zNHrPOI7JjLXKktvMD13RY+Sx3ZlHPkuR3fSZ1H+Pw99UXx21NsXdz1xXX8zBEIJVeKRl3Kv5E+3bP3a2iyuNAqc5LcGMA
Qq4PSsonuQU9EoqESlcXXXZ4WJlfgJxrtXlDoc4yVVbvxoLvvt8xm+9UNvFQ73KhAM/xqU3uzTbhETN/k4TD6Y7hAM9tQlxI4GMjXGu2yuXf4OHokdWeuz9vNZahL5i+oPpJOMVG
dBVMt0OTEaguVliOkB6ahzirs84j1MIe3LlApmphdQphoqHaPtY3SGEP6T/ekaV9Og2M2pA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

2j1gDfaCK

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/0yk0hisU9ep4Al9mGbFbvdVjbSxCy9mQ