

Desarrollo de un banco de pruebas para el estudio de intercambiadores de calor  
de tubos concéntricos para el laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de  
Ingeniería Mecánica

Juan Andrés Fernández Vargas y Marlon Jhoell Corzo Serrano

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero mecánico

Director

Diego Luis Franco Jácome

Ingeniero Mecánico PhD

Codirector

Juan Pablo Flórez Mera

Ingeniero Mecánico PhD

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
Año 2025

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a mi nonita “Mariela”, quien, aunque ya no se encuentra físicamente conmigo, continúa viviendo en mi memoria y en cada logro que alcanzo. Gracias por haberme criado, enseñado y por haberte preocupado por mis todos estos años. Fuiste y seguirás siendo alguien muy importante en mi vida; ya que todo lo que soy como persona te lo debo a ti. También lo dedico a mis padres, Ana Francisca y Sergio Martin por haberme dado la oportunidad de estudiar y por sus palabras de aliento para poder culminar una de las etapas más importante de mi vida. Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mis dos hermanos menores Miguel y Nicolas. Espero que este logro, que también es de ustedes, sirva de inspiración para el crecimiento y desarrollo personal de cada uno. Me siento orgulloso de ustedes y de la persona en la que se están convirtiendo. Asimismo, quiero también agradecer a mi mejor amigo José Alejandro por estar siempre presente y ofrecerme su apoyo incondicional en todo momento que lo llegue a necesitar.

*Juan Andres Fernandez Vargas*

Este proyecto está dedicado a mis padres, Libardo y Marcela, por su amor incondicional, a mi nona Teresa por ser ese motor que siempre me impulso, a mis hermanos Jeison y Paola por no permitirme dudar, a mi mejor amigo David por siempre estar presente. Por último, a Dios por darme la paciencia para soportar todas las dificultades y la fortaleza para superarlas.

*Marlon Jhoell Corzo Serrano*

### **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecemos a Dios por habernos dado la fuerza y la perseverancia de llegar a este punto de nuestras vidas. Un Agradecimiento especial al profesor Diego Franco por ser nuestro mentor y por habernos brindado su apoyo y conocimiento a lo largo de todo el proyecto.

A las personas de mantenimiento de nuestra escuela y de la Universidad en especial a Sair, David, Henry, Polo por haberse tomado el tiempo de atender nuestras consultas y ayudarnos en la adecuación del banco. Finalmente darles las gracias a los profesores de nuestra escuela y también de la escuela de Ingeniería de Sistemas especialmente al Profesor Juan Pablo y Juan Pernaletе por tomarse el tiempo para responder nuestras consultas y servirnos de apoyo para culminar el proyecto.

*Juan Andres Fernandez Vargas*

*Marlon Jhoell Corzo Serrano*

Agradezco al profesor Diego Luis Franco Jácome por la paciencia y el apoyo durante el desarrollo de todo el proyecto y al señor Juan José Codos Contreras por ser ese compañero que necesite a lo largo del proyecto.

*Marlon Jhoell Corzo Serrano*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1.Objetivos .....	20
1.1 Objetivo General .....	20
1.2 Objetivos Específicos .....	20
2. Marco teórico .....	21
2.1 Intercambiador de calor .....	21
2.2 Intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	21
2.2.1 Flujo paralelo .....	21
2.2.2 Flujo contracorriente .....	23
2.2.3 Funcionamiento de los intercambiadores de calor .....	23
2.2.4 Análisis intercambiadores de calor .....	23
3. Metodología .....	25
3.1 Desarrollo del banco de pruebas .....	25
3.2 Adecuación del banco del laboratorio .....	26
3.2.1 Estructura .....	26
3.2.2 Sistema de alimentación antiguo .....	26
3.2.3 Nuevo sistema de alimentación .....	27
3.2.4 Sistema de compresión .....	29
3.2.5 Sistema de control .....	32
3.2.6 Sistema adquisición de datos .....	34
3.3 Costos .....	36

3.4 Diseño de experimentos .....	37
3.4.1 Reconocimiento del funcionamiento del banco .....	37
3.4.2 Selección de variables en el sistema.....	44
3.4.3 Diseño experimental.....	44
3.4.4 Ejecución de los experimentos .....	45
3.5 Desarrollo de un modelo matemático de transferencia de calor .....	47
3.5.1 Diagrama de flujo estructural del modelo matemático.....	47
3.5.2 Descripción modelo matemático .....	50
3.6 Desarrollo de la interfaz Python.....	68
3.6.1 Interfaz Python .....	68
3.6.2 Diagrama de flujo de la GUI .....	70
3.6.3 Panel de control de la interfaz .....	70
4. Análisis y resultados .....	73
4.1 Resultados de los experimentos .....	73
4.1.1 Análisis de comportamiento estacionario.....	73
4.2 Análisis modelo matemático .....	78
5. Conclusiones .....	86
6. Recomendaciones.....	88
Referencias bibliográficas.....	89
Apéndices .....	92

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Comparación compresores.....	31
Tabla 2. Comparación caudal real de la bomba con el marcado por el caudalímetro, con la válvula de compuerta abierta completamente.....	39
Tabla 3. Comparación caudal real de la bomba con el marcado por el caudalímetro, con la válvula de compuerta parcialmente cerrada.....	39
Tabla 4. Comparación prueba del funcionamiento del banco.....	44
Tabla 5. Combinación experimental .....	45
Tabla 6. Presiones manométricas del sistema de refrigeración durante su operación .....	52
Tabla 7. Propiedades termodinámicas del agua a temperatura de entrada 25[°C].....	53
Tabla 8. Propiedades termodinámicas del R134a $T_{suc\_comp} = 19,50^{\circ}C$ y $h[4] = 268,2kJ/kg$ .....	53
Tabla 9. Parámetros geométricos intercambiador de doble tubo .....	54
Tabla 10. Componentes del coeficiente de transferencia de calor para la región bifásica del R134a a la presión absoluta de Baja. ....	66
Tabla 11. Librerías utilizadas en la interfaz.....	68
Tabla 12. Datos de temperatura registrados durante la experimentación de la prueba P2CAT15P .....	78

Tabla 13. Resultados para caudal $Q=0.696$ [l/min] .....	79
Tabla 14. Resultados para caudal $Q=3.775$ [l/min] .....	80
Tabla 15. Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a $25$ [°C] y caudal de $0,696$ [l/min]. .....	84
Tabla 16. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $3.775$ [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	94
Tabla 17. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $3.775$ [l/min] y flujo contraflujo, Toma 1 .....	95
Tabla 18. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $3.775$ [l/min] y flujo contraflujo, Toma 2 .....	97
Tabla 19. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $0.696$ [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	98
Tabla 20. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $0.696$ [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	100
Tabla 21. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $0.696$ [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	101
Tabla 22. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $15^{\circ}\text{C}$ , caudal $0.696$ [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	103
Tabla 23. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a $25^{\circ}\text{C}$ , caudal $3.775$ [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	104

Tabla 24. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	106
Tabla 25. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	107
Tabla 26. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	109
Tabla 27. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1.....	110
Tabla 28. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	112
Tabla 29. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	113
Tabla 30. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	115
Tabla 31. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1.....	116
Tabla 32. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	118
Tabla 33. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	119
Tabla 34. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	121

Tabla 35. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	122
Tabla 36. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	124
Tabla 37. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	125
Tabla 38. Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	127
Tabla 39. Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 35 [°C] y caudal de 0,696 [l/min]. .....	135
Tabla 40. Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 25 [°C] y caudal de 3,77 [l/min]. .....	136
Tabla 41. Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 35 [°C] y caudal de 3,77 [l/min]. .....	137

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1. Intercambiador de calor tubo doble .....	22
Figura 2. Diferentes regímenes de flujo y perfiles asociados de temperaturas en un intercambiador de calor de doble tubo.....	22
Figura 3. Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo.....	24
Figura 4. Estado inicial del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos .....	25
Figura 5. Estructura antes, durante y después de la limpieza .....	26
Figura 6. Montaje esquemático del tanque .....	27
Figura 7. Montaje real sistema alimentación .....	29
Figura 8. Esquemático sistema de alimentación .....	30
Figura 9. Selección tubo capilar.....	32
Figura 10. Termocupla tipo K en el taque monitoreada por el Controlador TZN4S.....	33
Figura 11. Tablero de control.....	34
Figura 12. Montaje real sistema adquisición de datos .....	35
Figura 13. Posición termocuplas y caudalímetro .....	35
Figura 14. Prueba caudal de la bomba .....	38
Figura 15. Esquema de configuración flujo paralelo .....	40

Figura 16. Esquema de la configuración flujo contracorriente.....	41
Figura 17. Termómetro digital UT320D.....	43
Figura 18. Comportamiento de la prueba del funcionamiento del banco .....	43
Figura 19. Estructura y secuencia del modelo matemático.....	48
Figura 20. Nomenclatura para el desarrollo del modelo matemático .....	51
Figura 21. Sección transversal intercambiador de calor de doble tubo .....	53
Figura 22. Arreglo de Resistencia Total Intercambiador.....	56
Figura 23. Esquema de régimen Paralelo .....	62
Figura 24. Esquema de Régimen en contracorriente .....	62
Figura 25. Diagrama de flujo de la GUI .....	71
Figura 26. Panel de control Interfaz GUI.....	72
Figura 27. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo .....	74
Figura 28. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente.....	75
Figura 29. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo .....	76
Figura 30. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente.....	77

Figura 31. Perfil de temperaturas a 25°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 0.696[l/min] .....	81
Figura 32. Perfil de temperaturas a 35°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 0.696[l/min] .....	83
Figura 33. Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 25[°C] y caudal de 0,696 [l/min]. .....	86
Figura 34. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	93
Figura 35. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	94
Figura 36. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	96
Figura 37. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	97
Figura 38. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	99
Figura 39. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	100
Figura 40. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	102
Figura 41. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	103

Figura 42. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	105
Figura 43. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	106
Figura 44. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	108
Figura 45. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1.....	109
Figura 46. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	111
Figura 47. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	112
Figura 48. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	114
Figura 49. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1.....	115
Figura 50. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	117
Figura 51. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	118
Figura 52. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	120

Figura 53. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min] y flujo paralelo, Toma 1 .....	121
Figura 54. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min] y flujo paralelo, Toma 2.....	123
Figura 55. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1 .....	124
Figura 56. Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min] y flujo contracorriente, Toma 2 .....	126
Figura 57. Perfil de temperaturas a 25°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 3.775[l/min] .....	132
Figura 58. Perfil de temperaturas a 35°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 3.775[l/min] .....	133
Figura 59. Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 35[°C] y caudal de 0,696 [l/min]. .....	134
Figura 60. Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 25[°C] y caudal de 3.775 [l/min]. .....	135
Figura 61. Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 35[°C] y caudal de 3.775 [l/min]. .....	136

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Base Tanque.....	92
Apéndice B. Resultados de la experimentación.....	92
Apéndice C. Ficha técnica de compresor Masterflux .....	128
Apéndice D. Ficha técnica del compresor QDZH65G .....	130
Apéndice E. Análisis matemático de otros experimentos.....	132
Apéndice F. Guía para el desarrollo de la practica del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos.....	138
Apéndice G. Manual de operación del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntrico .....	142
Apéndice H. Código Arduino para la recolección de datos.....	159
Apéndice I. Instrucciones uso de la interfaz .....	162
Apéndice J. Código Python.....	202

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un banco de pruebas para el estudio de intercambiadores de calor de tubos concéntricos para el laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de ingeniería mecánica

\*

**Autor:** Juan Andrés Fernández Vargas, Marlon Jhoell Corzo Serrano\*\*

**Palabras Clave:** Intercambiador de calor, Tubos concéntricos, Transferencia de calor, Desempeño, Refrigerante, LMTD, NTU

**Descripción:** Los intercambiadores de calor son dispositivos fundamentales para comprender los fenómenos físicos que actúan en los procesos de transferencia de energía térmica. Es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos a diferente temperatura que entran en contacto entre sí. Se encuentran en variedad de aplicaciones, desde producción de energía en grandes plantas hasta en sistemas de calefacción doméstico.

El Laboratorio de Sistema Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica es el escenario idóneo donde los estudiantes pueden complementar sus conocimientos teóricos asociados de las ciencias térmicas (Termodinámica y Transferencia de Calor), donde se estudian intercambiadores de calor. Para apoyar el proceso de formación de los estudiantes de ingeniería mecánica, así como de afianzar los conocimientos aprendidos en el curso de transferencia de calor, se construyó un banco de pruebas donde se pueda estudiar el fenómeno de intercambio de calor mediante intercambiadores de tubos concéntricos.

Este proyecto de investigación desarrolló la construcción de un banco de pruebas a partir de recursos y equipos disponibles en el laboratorio. El banco permite variar caudal y condiciones de flujo, usando como fluidos de trabajo agua a una temperatura controlada y refrigerante proveniente de un ciclo por compresión. Se realizó un diseño experimental de 24 combinaciones para evaluar el desempeño del banco y se elaboró un modelo matemático usando lenguaje Python para el análisis de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD) la efectividad - NTU.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Diego Luis Franco Jácome. Ingeniero Mecánico PhD. Codirector: Juan Pablo Flórez Mera. Ingeniero Mecánico PhD.

### Abstract

**Title:** Development of a Test Bench for the Study of Concentric Tube Heat Exchangers in the Thermal Systems Laboratory of the School of Mechanical Engineering\*

**Author:** Juan Andres Fernandez Vargas, Marlon Jhoell Corzo Serrano

**Key Words:** Heat exchanger, Concentric tubes, Heat Transfer, Performance, Refrigerant, LMTD, NTU

**Description:** Heat exchangers are fundamental devices for understanding the physical phenomena involved in thermal energy transfer processes.. They are designed to transfer heat between two fluids at different temperatures that come into contact with each other. They are systems are widely used in various applications, from large-scale energy production to domestic heating systems. from large scale energy production to domestic heating systems.

The Thermal Systems Laboratory of the School of Mechanical Engineering provides an ideal environment for students to complement their theoretical knowledge in thermal sciences (Thermodynamics and Heat Transfer), where heat exchangers are studied in detail. To support the learning process of mechanical engineering students and to reinforce the knowledge acquired in the heat transfer course, a test bench was constructed to study the heat exchange phenomenon using concentric tube heat exchangers.

This research project involved the construction of a test bench using resources and equipment available in the laboratory. The bench allows the flow rate and flow conditions to be varied using water at a controlled temperature and refrigerant from a compression cycle as working fluids. An experimental design of 24 combinations was carried out to evaluate the performance of the bench, and a mathematical model was developed in Python to analyze the logarithmic mean temperature difference (LMTD) and the NTU efficiency method.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Diego Luis Franco Jacome. Mechanical Engineer, PhD. Co-Advisor: Juan Pablo Florez Mera Mechanical Engineer, PhD.

## Introducción

Los intercambiadores de calor son dispositivos fundamentales para comprender los fenómenos físicos que actúan en los procesos de transferencia de energía térmica. Es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos a diferente temperatura que entran en contacto entre sí (Cofrico, 2025). Se encuentran en variedad de aplicaciones, desde producción de energía en grandes plantas hasta en sistemas de calefacción doméstico. Sus fluidos no se mezclan entre sí, por lo que se diferencian de las cámaras de mezclado (Cengel, 2011).

Existe una gran variedad de intercambiadores de calor y se pueden clasificar según diferentes parámetros: tipos de fluidos (líquido, gas, multifásico), arreglo de flujos (contracorriente, paralelo, cruzado), diseño (placas, tubos concéntricos, coraza y tubos, (entre otros), proceso (condensadores, evaporadores, calentadores, entre otros).

El Laboratorio de Sistema Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica es el escenario idóneo donde los estudiantes pueden complementar sus conocimientos teóricos asociados de las ciencias térmicas (Termodinámica y Transferencia de Calor), donde se estudian intercambiadores de calor. El aprendizaje es un proceso de formación donde el estudiante adquiere y desarrolla habilidades y conocimientos. En ciencias aplicadas, este proceso es complejo y requiere de una buena estructuración entre los fundamentos teóricos y los fenómenos físicos. El vínculo entre estos usualmente se establece mediante prácticas de laboratorio que hacen parte de los programas curriculares de las asignaturas. La práctica es un elemento indispensable en el proceso de aprendizaje, ya que no solo contribuye a la asimilación del conocimiento teórico si no que favorece un aprendizaje más profundo y duradero (Caceres, 2024).

Estas actividades experimentales desempeñan diversos roles. Además de facilitar la comprensión de los conceptos teóricos, hacer experimentos en el aula de clase, permite despertar el interés y la curiosidad de los estudiantes en el tema de estudio. Los fundamentos

teóricos junto con una enseñanza experimental didáctica, puede aportar en la formación integral del estudiante y en la adquisición y desarrollo de competencias que exige la construcción del conocimiento.

Para apoyar el proceso de formación de los estudiantes de ingeniería mecánica, así como de afianzar los conocimientos aprendidos en el curso de transferencia de calor, se identifica la ausencia de un banco de pruebas donde se pueda estudiar el fenómeno de intercambio de calor mediante intercambiadores de tubos concéntricos.

De acuerdo con lo anterior, este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un banco de pruebas que podría construirse teniendo en cuenta un diseño de fácil operación, fácil mantenimiento y de bajo costo, ya que pueden aprovecharse algunos recursos y equipos disponibles en el mismo laboratorio.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Desarrollo de un banco de pruebas para el Laboratorio de Sistemas Térmicos relacionado con el estudio de intercambiadores de calor de tubos concéntricos.

### 1.2 Objetivos Específicos

Acondicionar un banco de pruebas para el estudio paramétrico de intercambiadores de calor de tubos concéntricos que cumpla con las siguientes características:

- Permita variar los caudales y las configuraciones de flujo (paralelo y contraflujo).
- Utilice como fluidos de trabajo agua a una temperatura controlada y refrigerante proveniente de un ciclo por compresión.
- Cuento con un sistema de adquisición basado en Arduino para la medición de los parámetros característicos (temperaturas y flujos).

Elaborar un modelo matemático en lenguaje de programación Python que permita parametrizar el sistema y determinar analíticamente:

- Coeficiente global de transferencia de calor.
- Eficiencia térmica del sistema (desempeño termodinámico), aplicando el método del  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD y su margen de error.
- Pérdidas de energía en el sistema.

Implementar un manual de uso y plan de mantenimiento para el cuidado básico de los componentes del banco en pro de su conservación y disponibilidad.

Elaborar una guía de aprendizaje para el desarrollo de la práctica de laboratorio.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para transferir calor continuamente de un fluido a otro (ALFA LAVAL, s.f.). Estos equipos encuentras en cualquier sistema donde sea necesario regula la temperatura como en instalaciones de aire acondicionado, refrigeración o calefacción (Cofrico, 2025). De manera general se pueden clasificar en contacto directo cuando dos fluidos están en contacto entre sí, sin mezclarse o en contando indirecto cuando ambos fluidos están separados por una pared de la cual se transfiere el calor (ALFA LAVAL, s.f.). Otra manera de clasificar los intercambiadores de calor es a partir de su dirección de flujo, el número de pasos o la estructura del equipo.

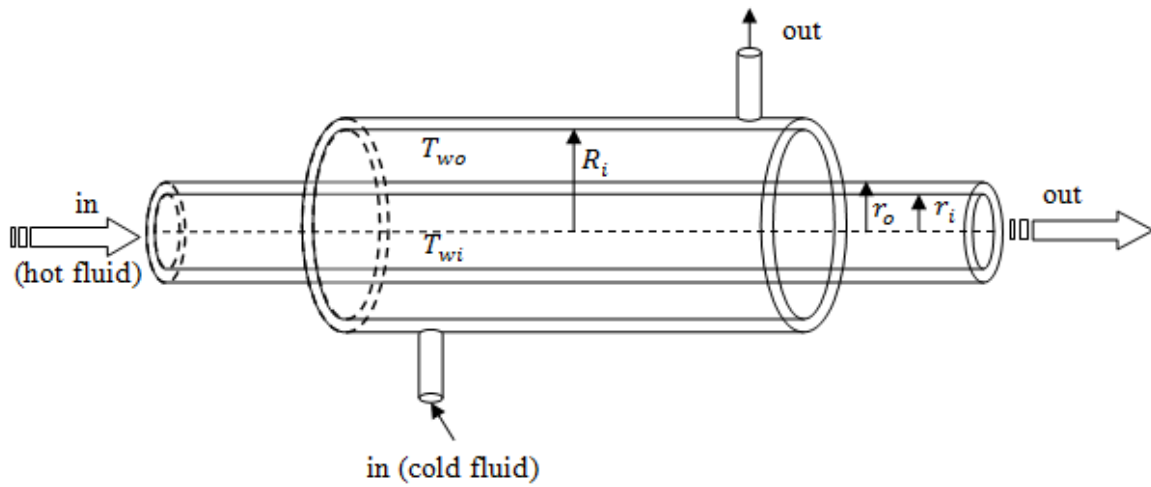
Para este proyecto se estudió el tipo más simple de intercambiador de calor de contacto indirecto que es el intercambiador de calor de tubos concéntricos.

### 2.2 Intercambiador de calor de tubos concéntricos

Este tipo de intercambiador de calor consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes (ver Figura 1), donde uno de fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos (Cengel, 2011). En un intercambiador de tubos concéntricos son posibles dos tipos de configuración el flujo paralelo y el flujo contracorriente también llamado contraflujo.

#### 2.2.1 *Flujo paralelo*

Los dos fluidos, el frío y el caliente, entran en el intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección (Cengel, 2011). La Figura 2.a muestra la disposición.

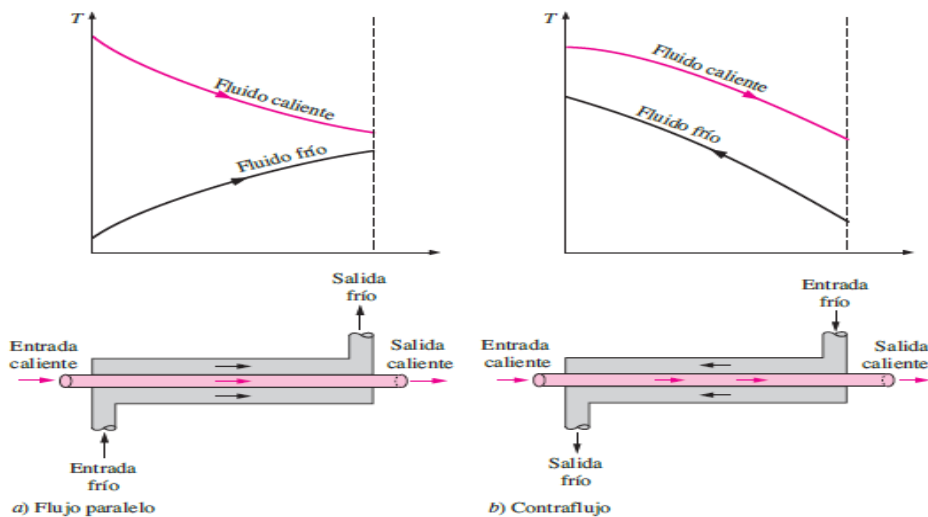
**Figura 1***Intercambiador de calor tubo doble*

Nota. Tomado de *Intercambiador de calor de doble tubo*, por SACOME, 2019.

<https://www.sacome.com/intercambiadores-calor-doble-tubo>

**Figura 2**

*Diferentes regímenes de flujo y perfiles asociados de temperaturas en un intercambiador de calor de doble tubo.*



Nota. (a) Flujo paralelo. (b) Flujo contracorriente. Tomado de (Cengel, 2011,p.630).

### **2.2.2 Flujo contracorriente**

Los dos fluidos, el frío y el caliente, entran en el intercambiador por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas (Cengel, 2011). La Figura 2.b muestra la disposición.

### **2.2.3 Funcionamiento de los intercambiadores de calor**

Un intercambiador de calor sigue el principio cero de la termodinámica, el calor fluye siempre de un medio caliente a un medio frío hasta alcanzar un equilibrio térmico (Cofrico, 2025).

En la práctica, la transferencia de calor se produce en tres (3) fases:

- Convectiva, entre el fluido caliente y la pared interna o externa del tubo interno (según la disposición de flujo en el tubo doble) que lo separa del fluido frío.
- Conductiva, a través de la pared del tubo interno.
- Convectiva, entre la pared interna o externa del tubo interno (según la disposición de flujo en el tubo doble) con el fluido a menor frío.

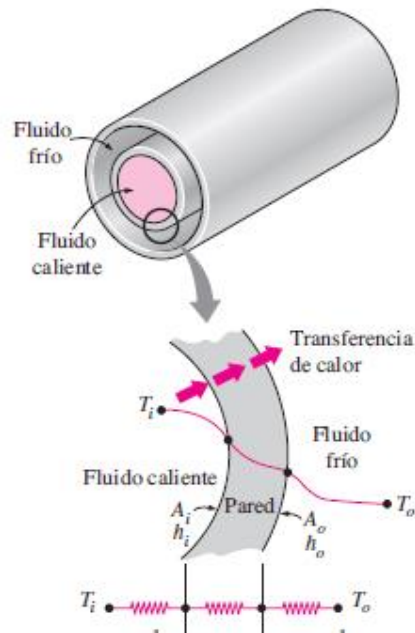
En la Figura 3 se muestra el comportamiento de un fluido caliente en una tubería interna y un fluido frío en el espacio anular.

### **2.2.4 Análisis intercambiadores de calor**

El análisis en intercambiadores de calor se puede realizar a través de dos métodos, la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD) y la efectividad NTU (número de unidades de transferencia), el primero es más apropiado para seleccionar un intercambiador de calor que logre un cambio de temperatura específico, mientras que el segundo, para predecir las temperaturas de salida de las corrientes de fluido caliente y frío en un intercambiador de calor específico (Cengel, 2011).

**Figura 3**

*Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo.*



*Nota.* Tomado de (Cengel, 2011,p.633).

De acuerdo con lo anterior, este proyecto de investigación busca la construcción de un banco de prueba donde se pueda estudiar el desempeño térmico de un intercambiador de calor tubos concéntricos aplicando el método  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD, en función de diferentes parámetros como: temperaturas de entrada y salida, flujos máscicos en los tubos y configuraciones de flujo (paralelo o contracorriente).

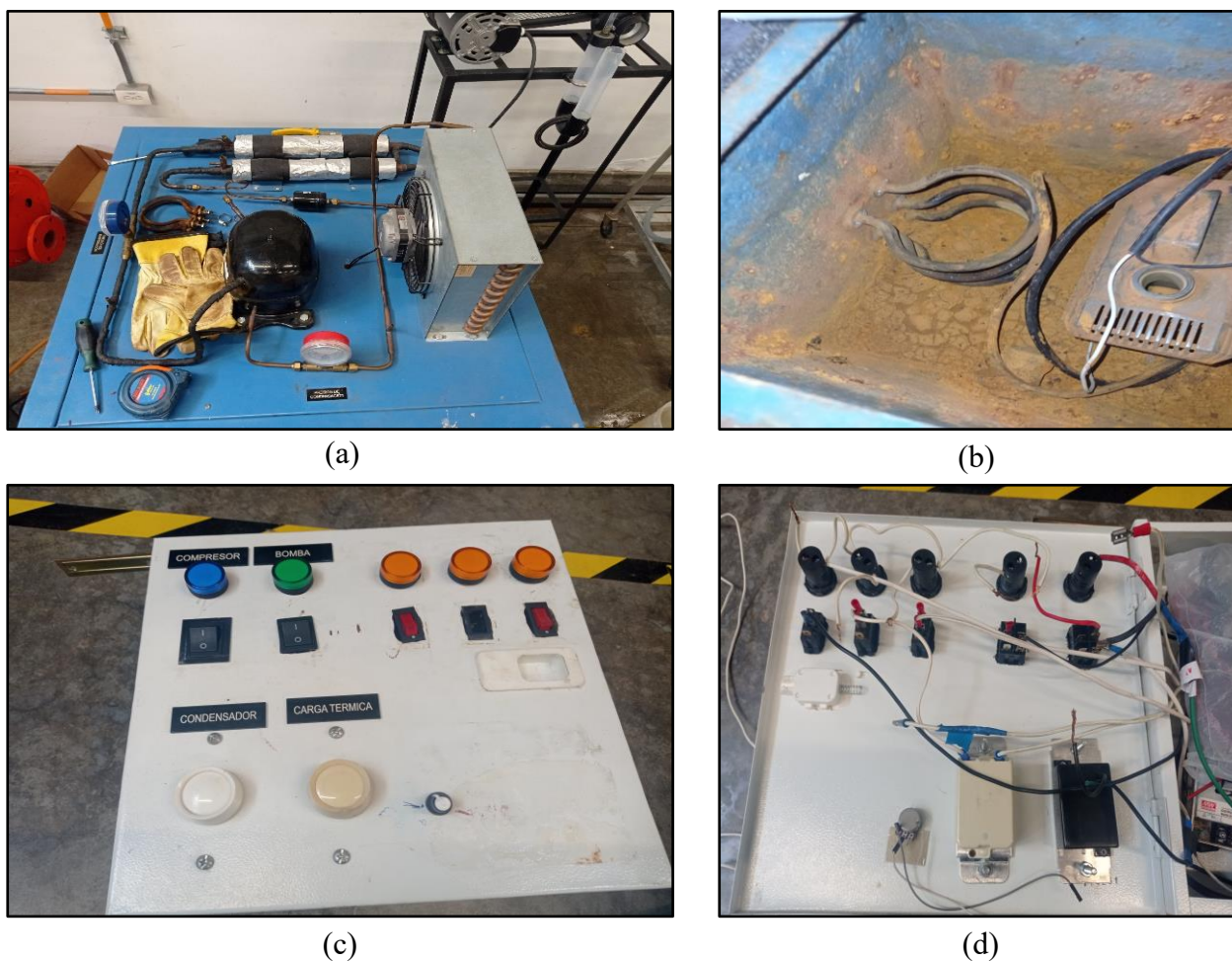
### 3. Metodología

#### 3.1 Desarrollo del banco de pruebas

Para la construcción del banco se aprovecharon algunos recursos y componentes disponibles en el Laboratorio de Sistemas Térmicos de la universidad Industrial de Santander (UIS). La Figura 4 presenta el equipo disponible en su estado inicial previo a las modificaciones.

#### Figura 4

*Estado inicial del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos*



*Nota.* (a) Sistema por compresión. (b) Sistema de alimentación. (c) Parte externa tablero de control. (d) Parte interna tablero de control.

### 3.2 Adecuación del banco del laboratorio

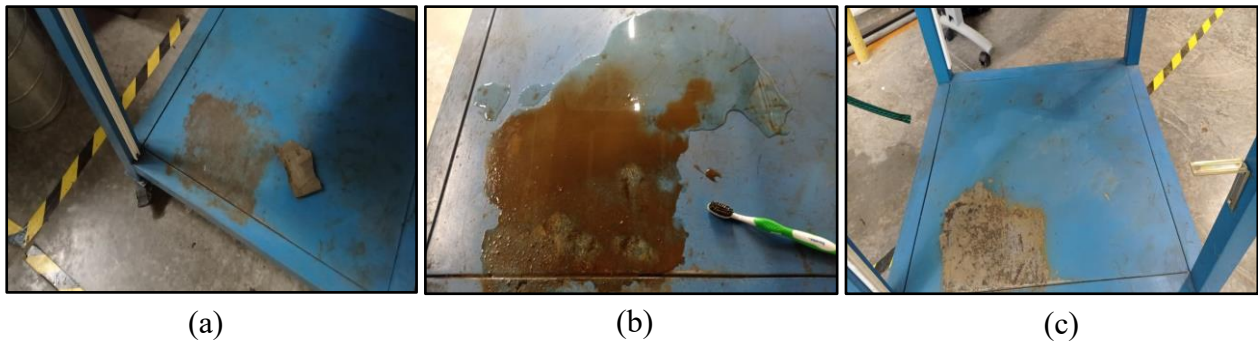
En primer lugar, se comprobó el estado de cada uno de los elementos presentes en el banco y a partir de ello se tomó la decisión de actuar sobre ellos ya sea mediante reparación, mantenimiento o sustitución.

#### 3.2.1 Estructura

La estructura del banco se encontró un poco corroída, por ello se procedió a limpiarla para un mejor estado ya que es la encargada de albergar y soportar todos los componentes en el banco como se aprecia en la Figura 5.

#### Figura 5

*Estructura antes, durante y después de la limpieza*



*Nota.* (a) Estructura antes. (b) Estructura durante la limpieza. (c) Estructura después de la limpieza.

#### 3.2.2 Sistema de alimentación antiguo

El estado inicial del sistema de alimentación compuesto por el tanque de almacenamiento, resistencias, bomba, y mangueras para el transporte y retorno del agua se encontraba en mal estado. Se procedió al desmonte y limpieza de las resistencias, como también de la bomba para comprobar su funcionamiento. Al energizar tanto las resistencias como la bomba, se evidenció que aún se encontraban en funcionamiento, sin embargo, debido

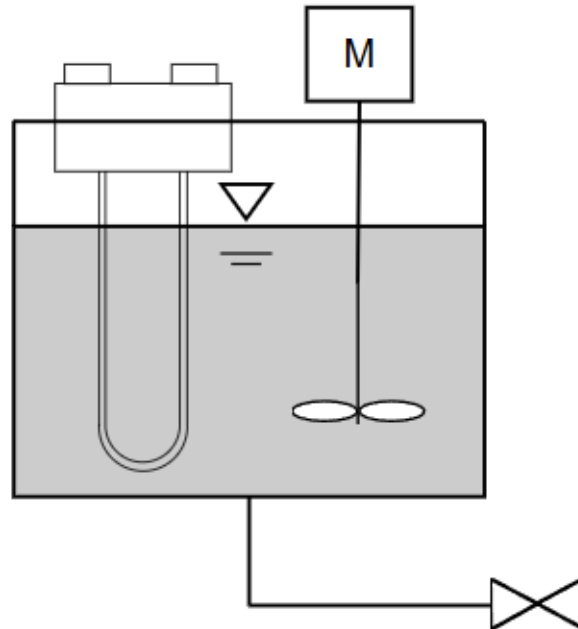
a la condición del tanque de almacenamiento, se optó por sustituir a otro en mejor estado disponible en el laboratorio.

### 3.2.3 *Nuevo sistema de alimentación*

Debido a las nuevas dimensiones del tanque de almacenamiento de agua, fue cambiada las resistencias por una tubular vertical de 750 W conectada a un sistema de control para que el agua alcance una temperatura de entrada. También, se añadió un agitador que mantiene un mezclado del agua y así alcanzar una homogeneidad térmica del fluido. Esto permite que durante la práctica garanticemos que el agua circula a la temperatura deseada. También, se añadió una válvula de globo a la salida del tanque para permitir la apertura o cierre del este. El esquema se ilustra en la Figura 6.

**Figura 6**

*Montaje esquemático del tanque*



De igual manera, se aplicó una intervención sobre la bomba, puesto se observó que era una bomba sumergible. El sistema solía operar con una bomba EVANS AQUA60W, sin embargo, por su condición de bomba sumergible no contaba con suficiente espacio dentro del

tanque para su operación. Por lo tanto, se cambió por una bomba de desagüe de lavadora ASKOLL que se encontraba disponible en el laboratorio en buenas condiciones.

A su vez, se cambiaron las mangueras de conexión entre el intercambiador de calor y el sistema de alimentación del banco. También, se añadió una manguera entre la válvula de apertura en el tanque y la succión de la nueva bomba. Estas mangueras se cambiaron por mangueras termoplásticas para transporte de fluidos, por su resistencia a las variaciones de temperatura sin deformarse y su flexibilidad y así evitar cambios de sección, optimizando el flujo masico. Como la bomba era de una lavadora, se acondicionó utilizando accesorios y tubería de PVC de 1/2 in para nuestro caso particular. Para la sujeción de la bomba junto con los accesorios, se utilizó un par de abrazaderas tipo colombina adaptada para fijar en la estructura y se instaló en la parte inferior de la misma.

Las 3 mangueras en cuestión fueron cambiadas por una manguera de 3/4 in de diámetro interno entre la salida del tanque y la entrada a la bomba, y otras dos mangueras de 1/2 in, una entre la salida de la bomba y la entrada al intercambiador de calor, y otra entre la salida del intercambiador y el retorno al tanque de alimentación. Las mangueras conectadas al intercambiador de calor se alternan de posición según la configuración deseada (flujo paralelo y flujo contracorriente). Además, en el retorno al tanque de alimentación se implementó una válvula de compuerta para variación del flujo de trabajo durante la experimentación. Para la conexión de las mangueras se usó adaptadores de manguera de 3/4 in y 1/2 in según el caso para evitar cambios de sección, sujetados por abrazaderas con las mismas dimensiones para prevenir posibles fugas. Para finalizar se diseñó un pequeño soporte (ver Apéndice A) para el tanque, con el fin de darle altura y cebar la bomba asegurando un bombeo de agua efectivo. La disposición final, así como los esquemas de las configuraciones se ilustran en la Figura 7 y Figura 8 respectivamente.

**Figura 7***Montaje real sistema alimentación*

(a)



(b)

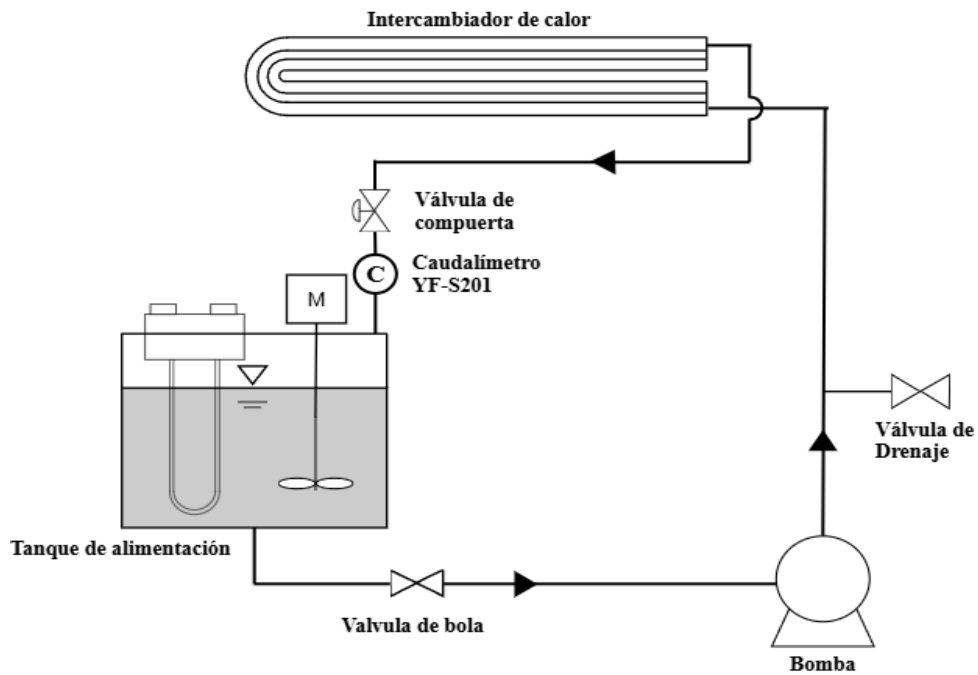


(c)

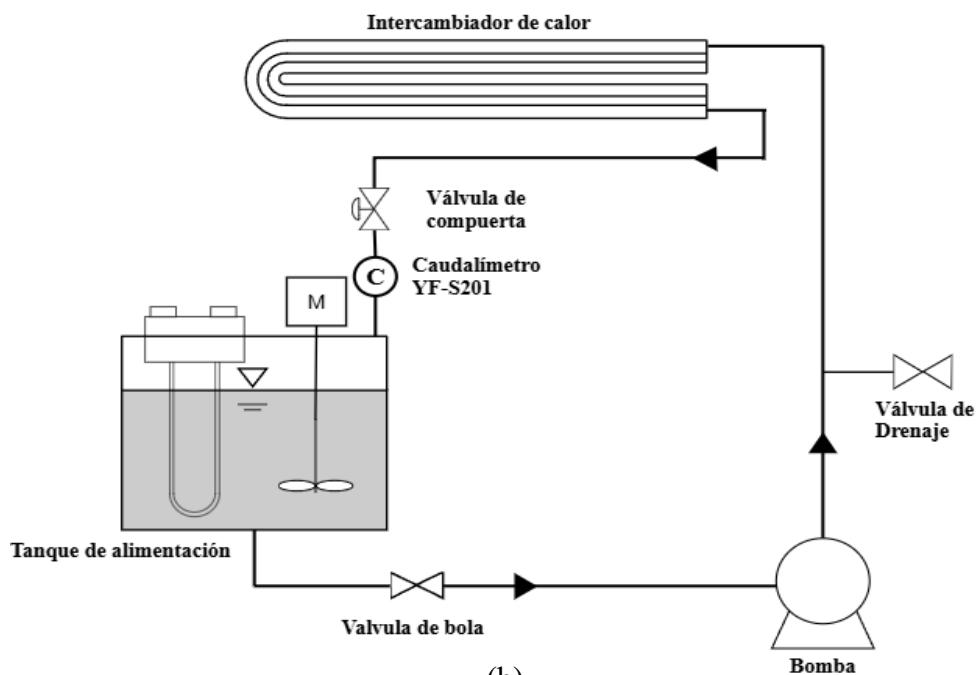
### 3.2.4 Sistema de compresión

El sistema por compresión incluía un compresor MASTERFLUX CASCADE17-0342Y3 el cual trabajaba con refrigerante R134a a una tensión de 24 a 48v, un intercambiador de calor de tubos concéntricos de 66cm, un condensador, un dispositivo de expansión (tubo capilar), un filtro, 2 manómetros y tubería de cobre.

La primera intervención se aplicó al compresor debido a que por el tiempo de desuso se desconocía su operación, al tratarse de un compresor que funciona a corriente directa se conectó a una fuente de alimentación directa de 24v y se comprobó su no operatividad. Se detectó que su tarjeta integrada se encontraba con falla y ante la imposibilidad de reparación,

**Figura 8***Esquemático sistema de alimentación*

(a)



(b)

*Nota.* (a) Configuración flujo contracorriente. (b) Configuración flujo paralelo.

se optó por el reemplazo del equipo y se seleccionó el compresor modelo QDZH65G. Este compresor opera a condiciones similares al anterior como se muestra en la Tabla 1, además su

control de refrigeración se puede realizar a partir de tubo capilar. Este dispositivo se adquirió como parte del presupuesto del laboratorio de Sistemas Térmicos de la UIS.

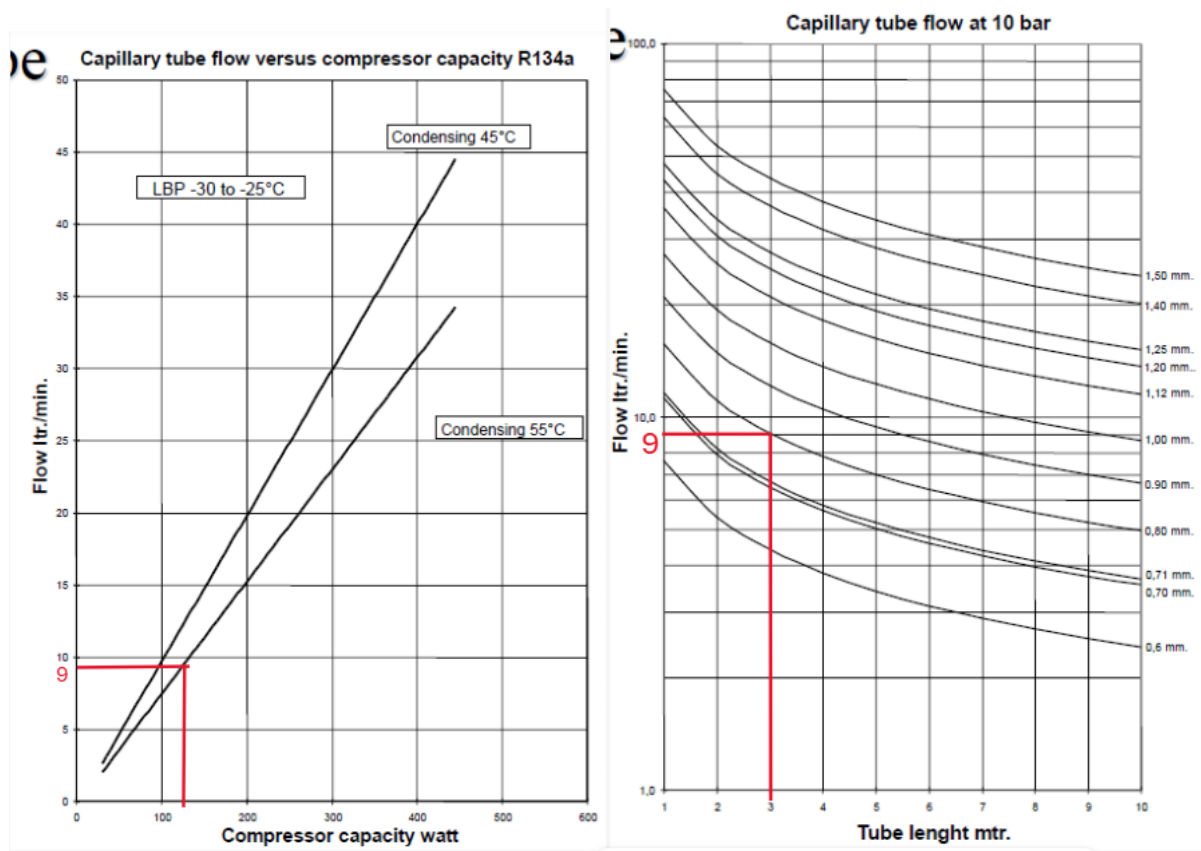
**Tabla 1**

*Comparación compresores*

	<b>Compresor Masterflux</b>	<b>Compresor QDZH65G</b>
<b>Rango de voltaje</b>	24 / 48 V	12 / 24 V
<b>Control de Refrigeración</b>	Capilar	Capilar
<b>Refrigerante</b>	R134A, R1234yf, R513A	R134a
<b>Condición de prueba ASHRAE</b>	LBP/MBP/HBP	LBP
<b>Fuente de alimentación de prueba</b>	24/48(VDC)	12/24(VDC)
<b>Temperatura de Evaporación</b>	-23.3 °C	-23.3 °C
<b>Temperatura de Condensación</b>	54.4 °C	54.4 °C
<b>Temperatura de Succión</b>	32.2°C	32.2°C
<b>Temperatura de Subenfriamiento</b>	32.2°C	32.2°C
<b>Temperatura de Ambiente</b>	32.2°C	32.2°C
<b>Rango de temperatura de evaporación</b>	-40°C a 15°C	-35°C a -15°C
<b>Capacidad de enfriamiento</b>	182 W	120W

*Nota.* Los datos se tomaron de las fichas técnicas de los compresores que se pueden encontrar en el Apéndice C y Apéndice D.

Luego de la puesta en marcha se evidenció que el tubo capilar presente en el equipo no era suficiente ya que el sistema se mantenía en estado sobrecalentado, por lo cual se pasó a la selección un nuevo tubo capilar. A partir de tablas diseñadas por Danfoss y utilizando algunos datos del compresor proporcionados por la ficha técnica (ver Tabla 1), se concluyó que se necesita un tubo capilar de 0.80mm (0.031 pulgadas) de diámetro interno y 3 metros de largo aproximadamente (ver Figura 9).

**Figura 9***Selección tubo capilar*

*Nota.* Tomado de *como calcular capilar de una nevera por tabla de Danfoss y programa Dancap* (Descripción del video), por Refriasesoria JC. (8 de Julio de 2025).

<https://www.youtube.com/watch?v=fi8ji0XeZhs>

### 3.2.5 Sistema de control

El tablero de control fue desmontado por completo y se comprobó la funcionalidad de los diferentes pilotos luminoso e interruptores. A la par, la caja de control fue adecuada para la nueva disposición ya que se incluyó un controlador Autonics TZN4S, este para moderar la resistencia y mantener la temperatura deseada en el agua durante el funcionamiento del equipo (ver Figura 10).

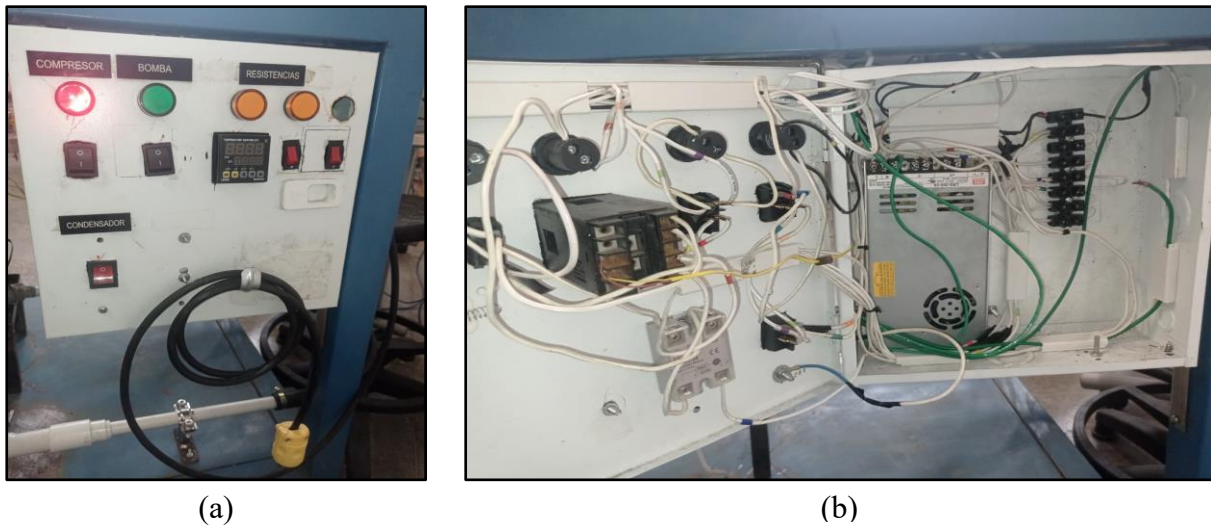
**Figura 10**

*Termocupla tipo K en el taque monitoreada por el Controlador TZN4S*



El controlador en cuestión está conectado a un relé de estado sólido para evitar quemarse por el alto consumo de la resistencia. A su vez, la caja de control alberga en su interior una fuente de 24 V que alimenta al relé de estado sólido. Esta fuente también alimenta el compresor del banco.

El tablero de control es alimentado por la red de corriente alterna de 120 V, y allí se distribuye a los diferentes componentes (condensador, bomba, resistencia, controlador, motor del agitador), cada elemento cuenta con un interruptor para su accionar (la fuente de 24 V se energiza directamente junto con el tablero de control) y pilotos luminosos para comprobar visualmente el encendido de cada uno (el condensador y motor del agitador no cuentan con piloto luminoso). El compresor cuenta con los mismos elementos solo que conectados a la fuente de 24 V. El montaje real se aprecia en la Figura 11.

**Figura 11***Tablero de control*

*Nota.* El esquema de la conexión se puede ver en el manual de operación en el Apéndice G.

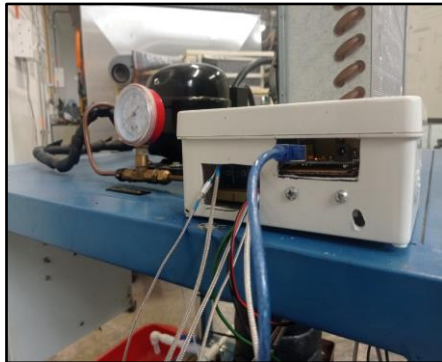
### 3.2.6 Sistema adquisición de datos

Por último, se implementó un sistema para la recolección de datos a partir de Arduino. Este sistema contiene cinco (5) sensores MAX6675, cada uno con su respectiva termocupla tipo K, que se encuentran dispuestas en el banco, también, se agregó un (1) caudalímetro YF-S201, ubicado en el retorno a tanque.

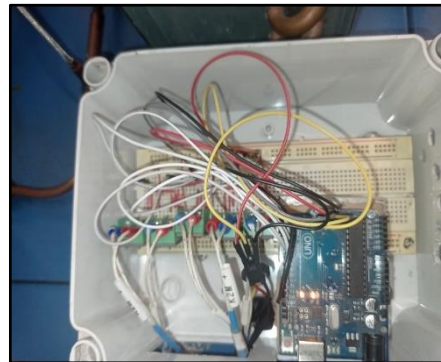
Toda la instrumentación utilizada en el banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos (termocuplas, caudalímetro, max6675) fue probada individualmente antes de la instalación para comprobar su buen estado. La conexión se ubicó en una caja de derivación plástica que se instaló en la estructura. El montaje de la caja, así como la ubicación de los sensores se aprecia en la Figura 12 y Figura 13 respectivamente.

**Figura 12**

*Montaje real sistema adquisición de datos*



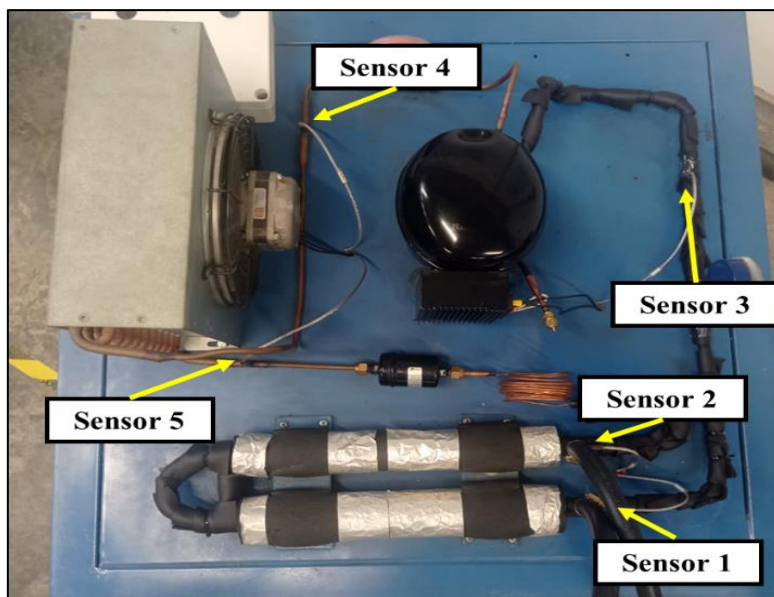
(a)



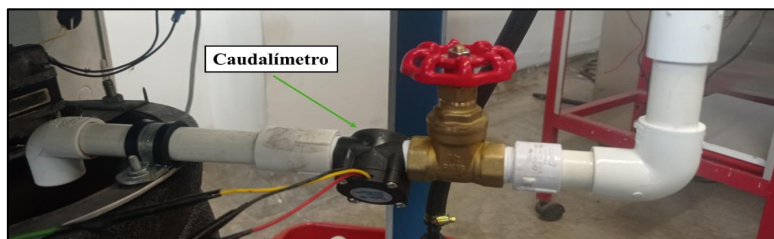
(b)

**Figura 13**

*Posición termocuplas y caudalímetro*



(a)



(b)

### 3.3 Costos

El costo total para el desarrollo del equipo se divide en gastos generales y gastos de construcción. Se pueden ver en la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

**Tabla 2**

*Gastos generales del proyecto*

<b>Recursos necesarios</b>	<b>Descripción</b>			<b>Valor unitario</b>	<b>Valor</b>
Papelería	Impresiones, fotocopias, memorias, etc.	Cantidad	1	\$ 200,000.00	\$ 200,000.00
Software	Productos Microsoft para la digitalización del documento.	Cantidad	1	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
Recursos bibliográficos	Necesario para la apropiación de información útil para el desarrollo del proyecto.	Cantidad	1	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
Viáticos	Transporte necesario para desplazarse durante el proyecto.	Cantidad	2	\$ 400,000.00	\$ 800,000.00
Computador	Necesario para la digitalización de la documentación, así como del desarrollo del software.	Cantidad	2	\$ 2,000,000.00	\$ 4,000,000.00
Asesorías profesionales	Asesoría durante el desarrollo del proyecto.	Horas	30	\$ 40,000.00	\$ 1,200,000.00
				<b>Subtotal</b>	<b>\$ 6,800,000.00</b>

**Tabla 3***Gastos de construcción del banco*

<b>Recursos necesarios</b>	<b>Descripción</b>		<b>Valor unitario</b>	<b>Valor</b>
Material para la construcción	Material para la estructura del sistema, así como los diferentes componentes necesarios como compresor, condensador, bomba, tanque, resistencias, etc.	Cantidad 1	\$ 3,700,000.00	\$ 3,700,000.00
Proceso de fabricación	Para el montaje del sistema.	Cantidad 1	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
			<b>Subtotal</b>	\$ 4,400,000.00
Imprevistos 10%	Necesario por si ocurre algún gasto adicional			\$ 440,000.00
<b>Total</b>				<b>\$ 11,640,000.00</b>

*Nota.* Adaptado de: Autores.

### 3.4 Diseño de experimentos

Una vez adecuado completamente el banco, se procedió al diseño de experimentos como se muestra a continuación.

#### 3.4.1 Reconocimiento del funcionamiento del banco

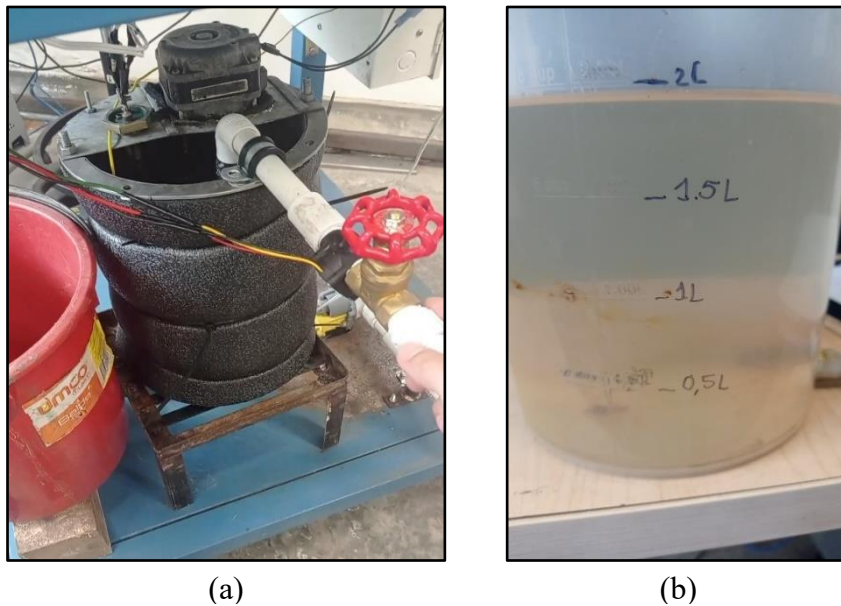
El banco de intercambiador de calor de tubos concéntricos permite el cambio de configuración entre flujo paralelo y flujo contracorriente, esto a partir de alternar la posición de las mangueras en el intercambiador de calor. Por ello, se busca evaluar el rendimiento del equipo en ambas configuraciones. El esquema para cada configuración se presenta en la Figura 15 y Figura 16. Se realizaron pruebas piloto para determinar las variables de experimentación, en primer lugar, se comprobó la bomba, esto para conocer el caudal total y a su vez comprobar

la exactitud del caudalímetro YF-S201 ya que al no ser un sensor de precisión su medición se puede afectar, por ello recomiendan trabajar con flujos conocidos debido a que calibrado puede tener una precisión del 10% (Naylamp Mechatronics SAC, 2023, párrafo tercero).

Se accionó la bomba y se espero hasta registrar un caudal constate en el caudalímetro. Una vez estabilizada la bomba, se recogio el agua en un recipiente durante treinta (30) segundos para no permitir que el tanque perdiera mucho volumen de agua (ver Figura 14). Esta prueba se realizo cinco (5) veces, apagando y encendiendo la bomba en cada experimento, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.

### Figura 14

*Prueba caudal de la bomba*



A partir de esta prueba se decidió realizar otra prueba, esta vez cerrando parcialmente la válvula de compuerta para comprobar si se presentaba el mismo fenomeno. Esta prueba se realizó siguiendo la metodología descrita anteriormente, con la diferencia de que cuando la bomba se estabilizaba se procedia a cerrar la válvula de compuerta hasta ver un valor alrededor de los 1.767[l/min] en los datos registrados por el caudalímetro. Entre cada experimento se abria y cerraba la válvula de compuerta. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 4**

*Comparación caudal real de la bomba con el marcado por el caudalímetro, con la válvula de compuerta abierta completamente*

<b>Toma</b>	<b>Caudal Real [l/min]</b>	<b>Caudal Caudalímetro [l/min]</b>
<b>1</b>	3.723	3.873
<b>2</b>	3.749	3.944
<b>3</b>	3.804	3.923
<b>4</b>	3.653	3.792
<b>5</b>	3.949	3.845
<b>Promedio</b>	3.775	3.875

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Tabla 5**

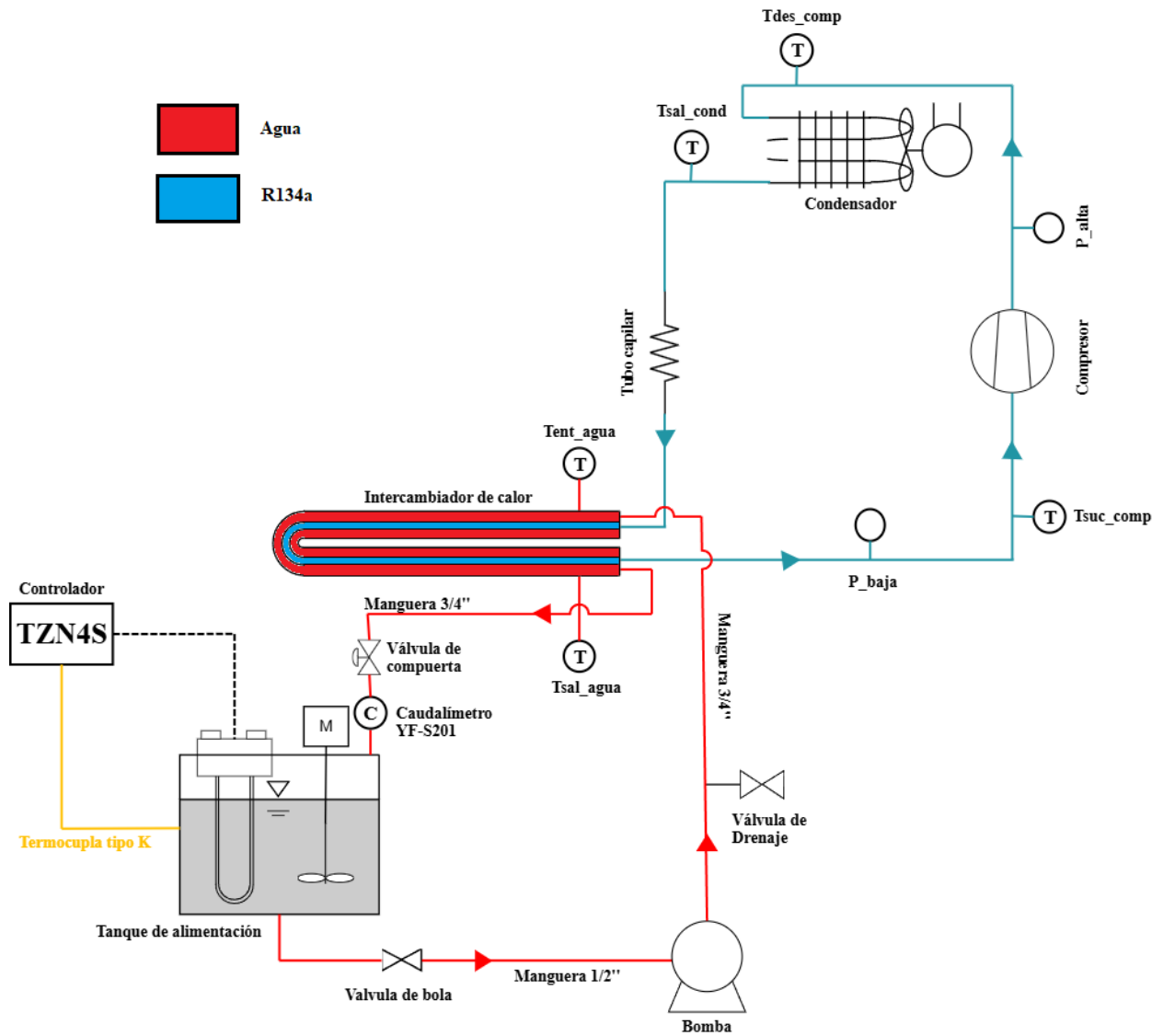
*Comparación caudal real de la bomba con el marcado por el caudalímetro, con la válvula de compuerta parcialmente cerrada*

<b>Toma</b>	<b>Caudal Real [l/min]</b>	<b>Caudal Caudalímetro [l/min]</b>
<b>1</b>	0.746	1.84
<b>2</b>	0.647	1.687
<b>3</b>	0.696	1.897
<b>4</b>	0.746	1.75
<b>5</b>	0.647	1.661
<b>Promedio</b>	0.696	1.767

*Nota.* Adaptado de: Autores.

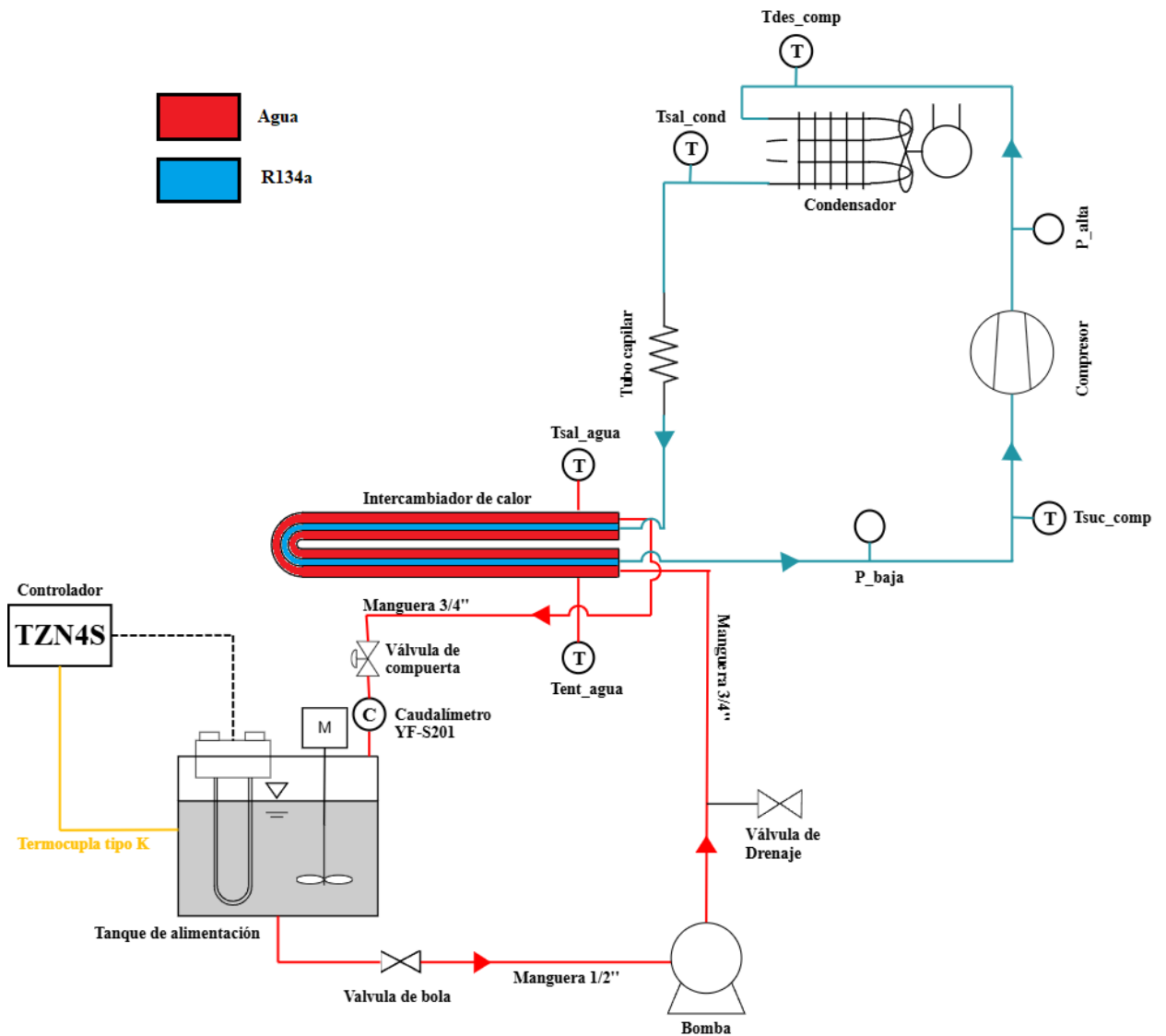
Figura 15

Esquema de configuración flujo paralelo



**Figura 16**

*Esquema de la configuración flujo contracorriente*

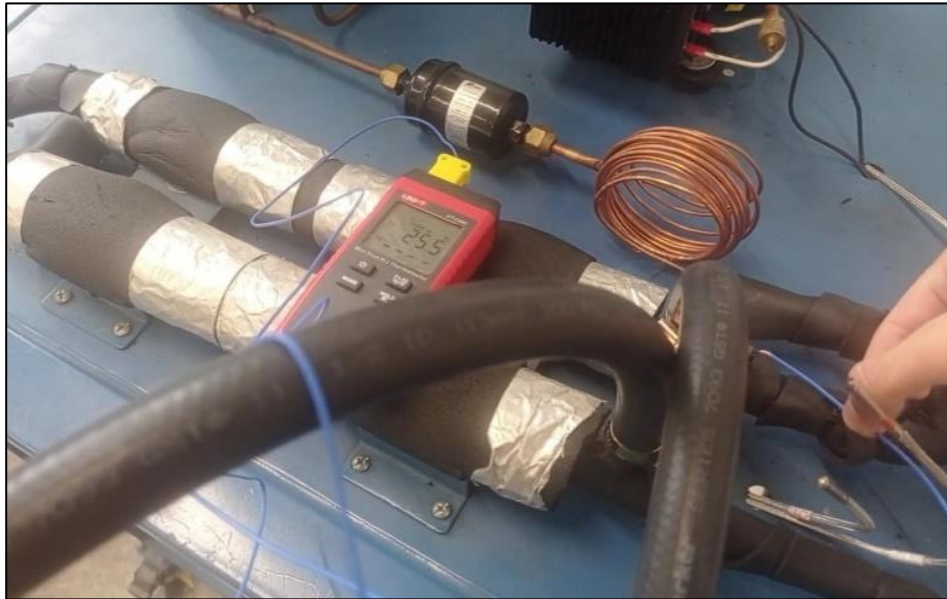
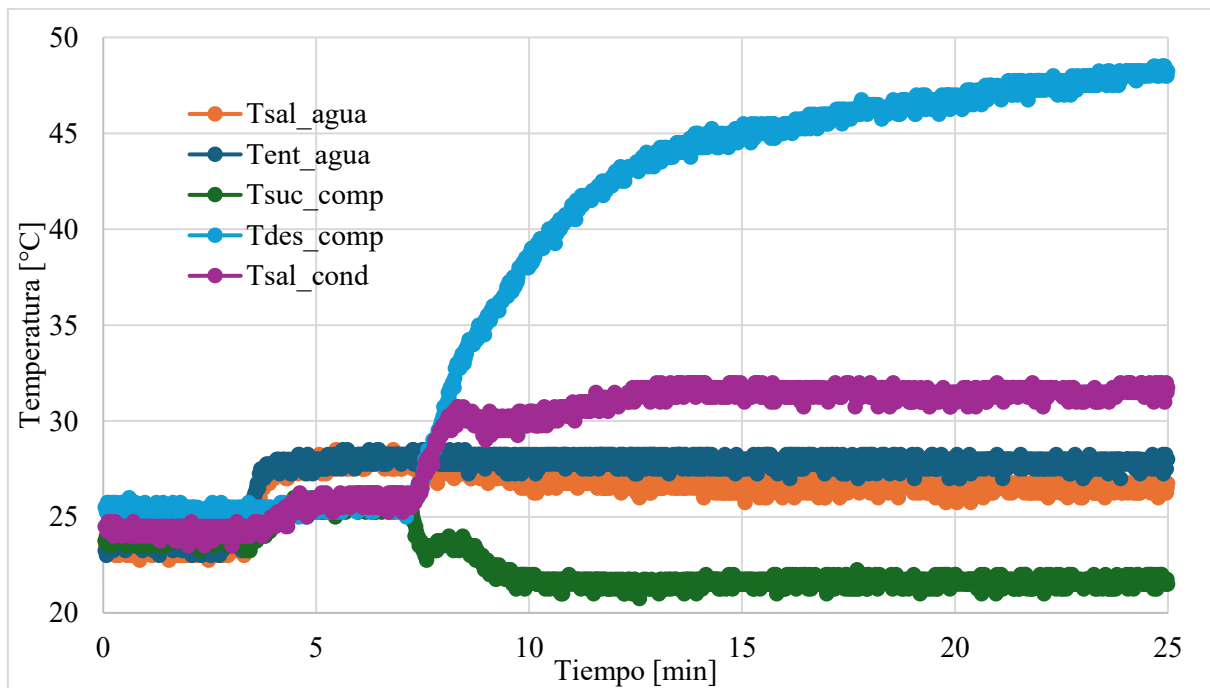


Observando el comportamiento en los experimentos, y obteniendo los porcentajes de error del caudalímetro usando ecuación 1 de 2.64% y 153.87% respectivamente, se comprobó el correcto funcionamiento del caudalímetro YF-S201 para el caudal total de la bomba, sin embargo al cerrar parcialmente la valvula de compuerta para cambiar el caudal, este pierde su exactitud ya que al estar cerca de su rango mínimo de operación (1-30 [l/min]), su % de error de incrementa, debido a ello, se decidió utilizar los valores promedio de los caudales reales de 3.775 [l/min] y 0.696 [l/min] como variables y utilizar el registro de el caudalímetro como una guía visual del funcionamiento de la bomba, como también del cierre parcial correcto en la válvula de compuerta.

$$\%error = \left( \frac{|Valor\ real - Valor\ caudalímetro|}{Valor\ real} \right) * 100 \quad \text{Ecu. 1}$$

Como la instrumentación había sido probada antes de su instalación y estaban en óptimas condiciones, se consideró una posible interferencia magnética en el banco afectando la diferente instrumentación, por ello con el banco en pleno funcionamiento se hizo un registro de las temperaturas recolectadas por el Arduino, comparándolas con un termómetro digital UT320D (ver Figura 17). Este termómetro es un dispositivo de contacto de alta precisión que cuenta con medición de temperatura con termopar tipo K (La Red Electrónica S.A.S).

Para este procedimiento se mantuvo el agua en el tanque de alimentación a 25°C y se esperó a que el sistema estuviera en régimen estacionario, observando los datos en tiempo real proporcionados por el Arduino, luego usando el termómetro digital se verifico la temperatura introduciendo su termopar en el mismo lugar donde se albergan las termocuplas del sistema y se registraron. El comportamiento como los datos recolectados se muestran en la Figura 18 y la Tabla 6, respectivamente.

**Figura 17***Termómetro digital UT320D***Figura 18***Comportamiento de la prueba del funcionamiento del banco*

**Tabla 6***Comparación prueba del funcionamiento del banco*

	Arduino [°C]	Termómetro [°C]
<b>Tsal_agua</b>	26.57	25.6
<b>Tent_agua</b>	27.83	26.6
<b>Tsuc_comp</b>	21.67	19.8
<b>Tdes_comp</b>	47.17	48.4
<b>Tsal_cond</b>	31.50	30.3

*Nota.* Adaptado de: Autores.

Comprobada la lectura en la instrumentación, se apreció una leve diferencia en la temperatura obtenida por los sensores con los del termómetro digital (aproximadamente 1°C). Por ello, se le atribuyo alguna interferencia magnética ya que estos dispositivos son muy susceptibles a estos (Minco Products, Inc, s.f.).

### **3.4.2 Selección de variables en el sistema**

Las variables consideradas son la temperatura de entrada del agua al intercambiador de calor, a su vez el flujo masico de agua circulando por el sistema y la configuración de las mangueras para determinar si el intercambiador se encuentra desempeñando a flujo paralelo o flujo contracorriente (contraflujo). Se considero tres (3) temperaturas de entrada de agua 15°C, 25°C y 35°C, los caudales 3.775 [l/min] y 0.696 [l/min].

### **3.4.3 Diseño experimental**

En base a lo anterior, se desarrolló un modelo experimental de doce (12) combinaciones de dos (2) repeticiones cada uno para un total de veinticuatro (24) experimentos como se muestra en la Tabla 7. Cada experimento se identifica con una nomenclatura que indica si se trata de la prueba 1 o 2 dentro de cada bloque (P1 o P2

respectivamente), el caudal de agua circulando por el sistema 3.775 [l/m] o 0.696 [l/m] (CA o CC respectivamente), la temperatura de ingreso del agua al intercambiador de calor a 15, 25 o 35°C (T15, T25 o T35) y por último la configuración de las mangueras para determinar la dirección de flujo paralelo o flujo contracorriente (P o C).

**Tabla 7***Combinación experimental*

<b>Toma</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Caudal [l/m]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Configuración</b>
<b>1</b>	P1CAT15P P2CAT15P	3.775	15	Paralelo
<b>2</b>	P1CCT15P P2CCT15P	0.696	15	Paralelo
<b>3</b>	P1CAT25P P2CAT25P	3.775	25	Paralelo
<b>4</b>	P1CCT25P P2CCT25P	0.696	25	Paralelo
<b>5</b>	P1CAT35P P2CAT35P	3.775	35	Paralelo
<b>6</b>	P1CCT35P P2CCT35P	0.696	35	Paralelo
<b>7</b>	P1CAT15C P2CAT15C	3.775	15	Contraflujo
<b>8</b>	P1CCT15C P2CCT15C	0.696	15	Contraflujo
<b>9</b>	P1CAT25C P2CAT25C	3.775	25	Contraflujo
<b>10</b>	P1CCT25C P2CCT25C	0.696	25	Contraflujo
<b>11</b>	P1CAT35C P2CAT35C	3.775	35	Contraflujo
<b>12</b>	P1CCT35C P2CCT35C	0.696	35	Contraflujo

*Nota.* Adaptado de: Autores.

#### **3.4.4 Ejecución de los experimentos**

La Figura 15 y Figura 16 presenta un diagrama esquemático completo del banco de intercambiador de calor de tubos concéntricos en régimen paralelo y contraflujo respectivamente. Para desarrollar los experimentos, se llevó a cabo el siguiente

procedimiento en el banco de pruebas. En primer lugar, se verifico que la válvula de bola y la válvula de drenaje estuvieran cerradas antes del llenado del tanque de alimentación. Luego, se llenó el tanque de alimentación con agua a temperatura ambiente hasta asegurarnos que gran parte de la resistencia (el vástago no puede tener ocho (8) cm por fuera del agua o podría dañarse) quedara cubierta de agua.

Posteriormente se energizó el banco y seguidamente se encendió el sistema de control de temperatura junto con el agitador y se programó para alcanzar la temperatura deseada (15, 25 o 35°C). Una vez obtenida la temperatura deseada, se abrió la válvula de bola y se esperó a que la bomba se cebara (alrededor de 1 minuto). Se añadió agua al tanque nuevamente hasta cubrir la resistencia casi en su totalidad. A la par, se encendió el sistema de adquisición de datos para la recolección de datos.

Con el sistema de adquisición de datos activo, se encendió la bomba. Una vez alcanzada la condición estacionaria de flujo de la bomba (alrededor de 10 minutos), se encendió el compresor y condensador y se inició la prueba esperando que el sistema alcanzara un régimen estable. En cuanto el banco alcanza un régimen estable alrededor de los 20 minutos de operación.

Durante las pruebas se recolectaron los comportamientos de la temperatura a través del sistema de adquisición de datos, estos datos se tomaron cada 3 segundos y eran almacenados automáticamente. Se registro la presión manométrica en el momento de régimen estacionario del sistema. Cada prueba duro alrededor de 30 minutos. Al finalizar cada prueba se apagó la bomba, compresor y condensador, se cerró la válvula de bola y se abrió la válvula de drenaje para evacuar el sistema.

Entre pruebas, se dejó un tiempo de descanso de 30 minutos para que el sistema volviera condiciones ambientales (temperatura ambiente en todos los puntos). Este tiempo era monitoreado con el sistema de adquisición de datos para conocer cuando poder

iniciar la siguiente prueba. Para iniciar la siguiente prueba, se repitió el mismo protocolo descrito anteriormente.

La toma de datos se realizó siguiendo el orden de la Tabla 7 esto con el fin de facilitar la recolección de datos antes de cambiar la configuración del intercambiador de calor. Cuando correspondió los experimentos a 15°C, el sistema se encendió previamente sin la resistencia, y se dejó trabajar alrededor de 40 minutos hasta alcanzar la temperatura de 15°C en el tanque de alimentación. Por otra parte, cuando correspondió el caudal de 0.696 [l/min], se esperó a que la bomba alcanzara su condición estacionaria y se ajustó la válvula de compuerta para el caudal en cuestión. Todo esto monitoreado con el sistema de adquisición de datos.

### **3.5 Desarrollo de un modelo matemático de transferencia de calor**

Para describir de manera estructural los pasos empleados para el desarrollo del modelo matemático se realizó un diagrama de flujo que se explica a continuación.

#### ***3.5.1 Diagrama de flujo estructural del modelo matemático***

El siguiente diagrama de flujo presenta de manera estructurada y secuencial los pasos a seguir respecto al modelo matemático empleado para la evaluación de los parámetros de transferencia de calor presentes en el banco de pruebas.

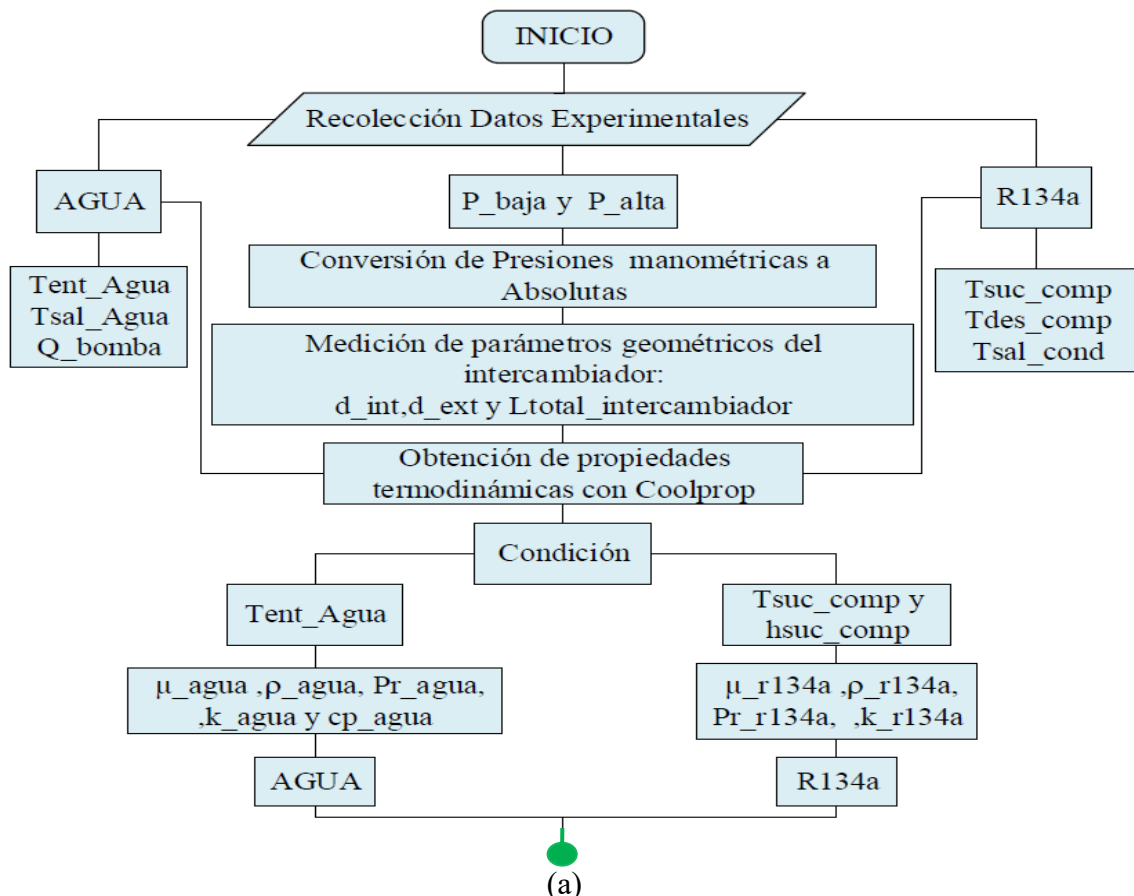
La primera parte del diagrama se centra en la recolección y preparación de los datos necesarios para el análisis del sistema. En esta etapa se registran las variables operativas esenciales, tales como temperatura, caudal y presiones de los fluidos involucrados. Paralelamente, se realiza la obtención de las propiedades termodinámicas correspondientes a cada fluido, lo que permite contar con la información precisa requerida para los cálculos posteriores (Ver Figura 19.a).

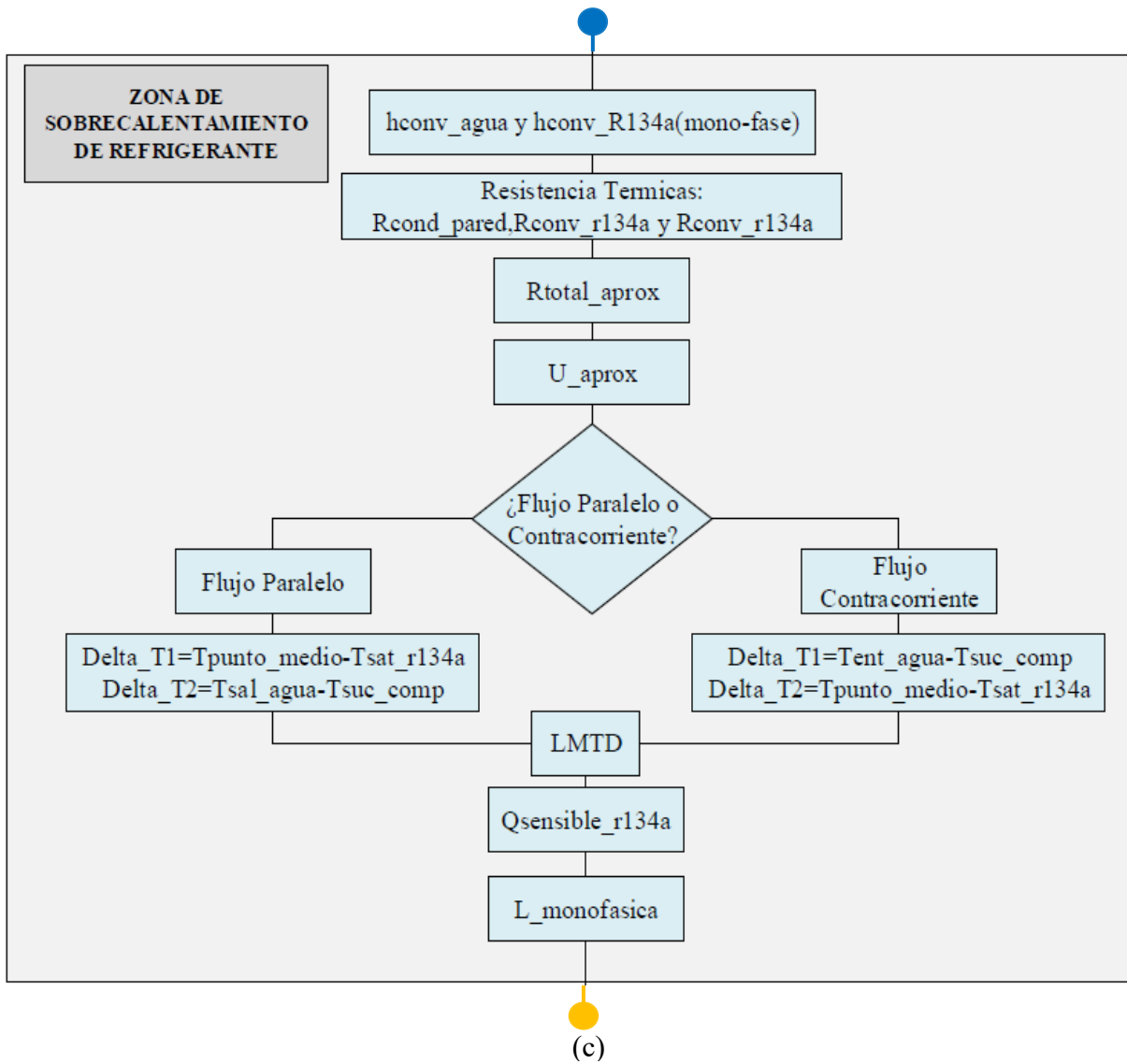
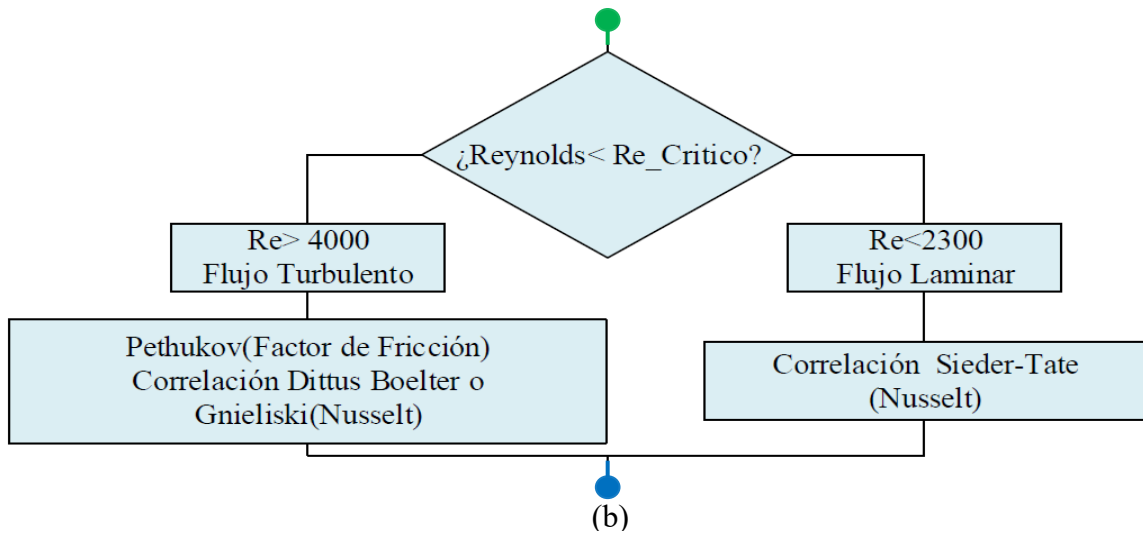
En la etapa siguiente, se lleva a cabo un análisis del flujo para ambos fluidos. Según el valor del número de Reynolds calculado, se determina el régimen de flujo

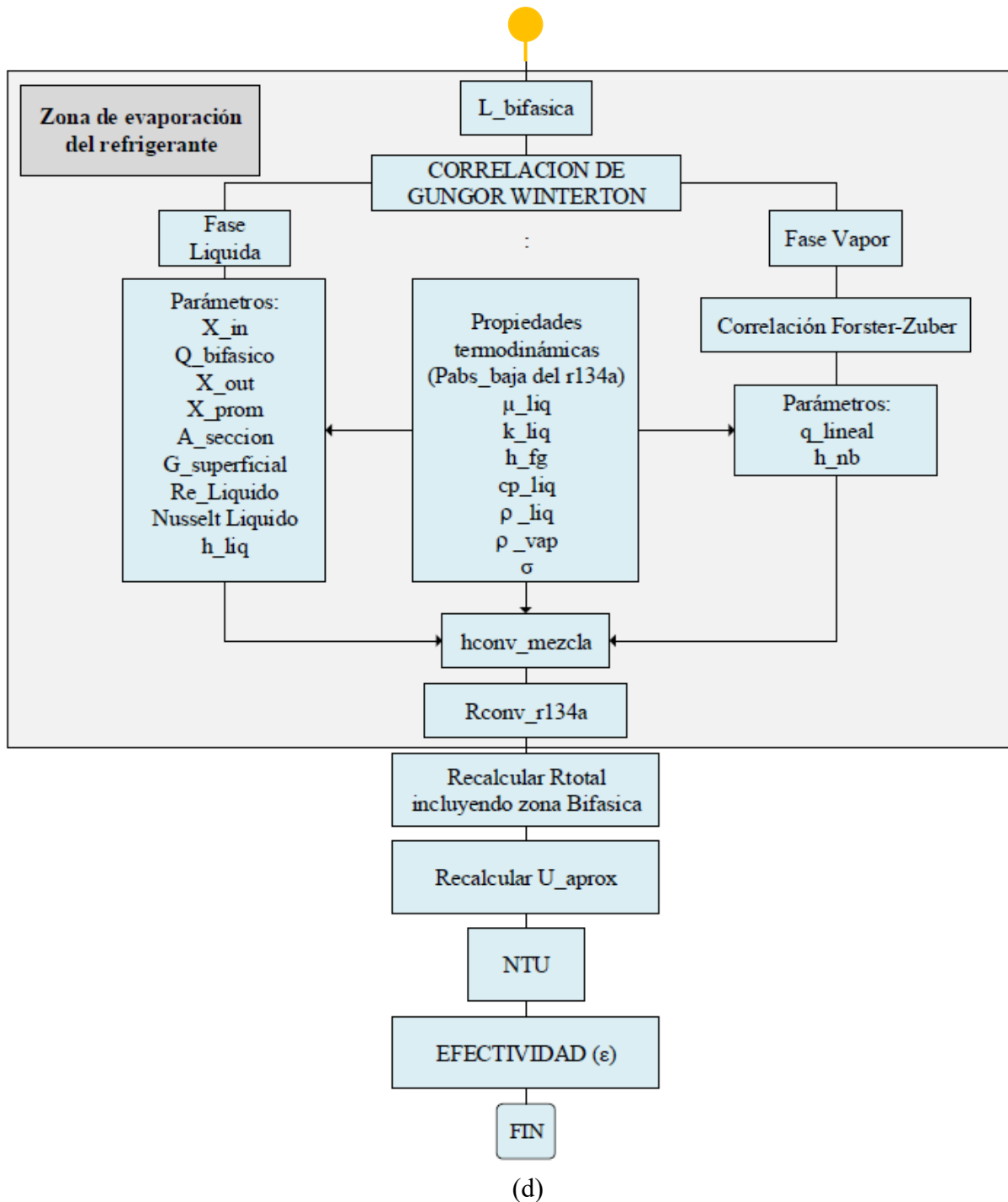
correspondiente (laminar o turbulento) lo que permite aplicar las correlaciones específicas que rigen cada condición (ver Figura 19.b). La siguiente etapa, inicia el proceso de análisis en la zona donde refrigerante se encuentra en una sola fase dentro del intercambiador (ver Figura 19.c). Finalmente, la última etapa describe el proceso que se utilizó para el comportamiento del refrigerante en la zona en la cual se encuentra en más de una fase. Asimismo, se finaliza con el proceso para obtener la efectividad en el intercambiador (ver Figura 19.d).

**Figura 19**

*Estructura y secuencia del modelo matemático*





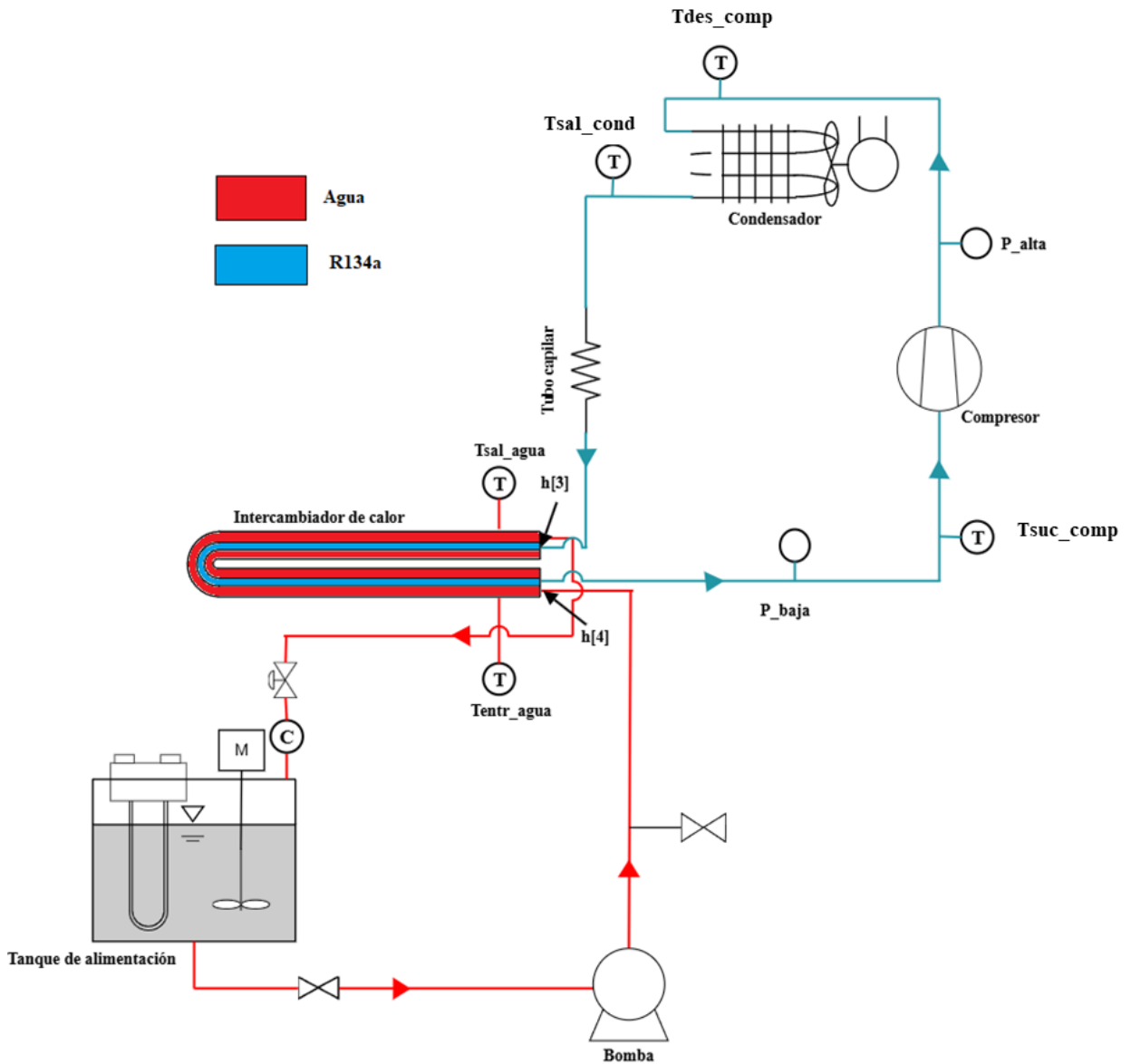


### 3.5.2 Descripción modelo matemático

El procedimiento descrito a continuación tiene como finalidad la caracterización del desempeño térmico de un intercambiador de calor de tubos concéntricos, en el cual se establece un proceso de transferencia de energía entre agua y el refrigerante R134a. La Figura 20 contiene la nomenclatura utilizada durante el desarrollo del modelo.

**Figura 20**

*Nomenclatura para el desarrollo del modelo matemático*



*Nota.* Este esquema corresponde a régimen en contraflujo, cuando se cambia de régimen a paralelo, la temperatura de entrada y salida de agua se invierten.

Para este análisis, se realizaron mediciones experimentales de temperatura, presión y caudal (ver Tabla 8), con el objetivo de caracterizar los estados termodinámicos del R134a durante su circulación en el sistema.

**Tabla 8***Presiones manométricas del sistema de refrigeración durante su operación*

<b>Símbolo</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$P_{Baja}$	Presión de Baja	172.3	<i>kPa</i>
$P_{Alta}$	Presión de Alta	723.9	<i>kPa</i>

*Nota.* Los valores mostrados fueron levantados para las dos condiciones de flujo de agua en el intercambiados (0,6962[l/min] y 3,77[l/min]). A pesar de que se cambiaron las condiciones operacionales del flujo de agua, las lecturas de los manómetros del ciclo de refrigeración no presentaron ninguna variación significativa. Adaptado de: Autores.

Dado que los valores de presión reportados en la Tabla 8 corresponden a presiones manométricas, resulta necesario considerar la presión atmosférica local (90,7kpa) en el lugar donde se llevan a cabo las pruebas del equipo, de manera que pueda obtenerse la presión absoluta requerida para el análisis.

Las Tabla 9 y Tabla 10 presentan las propiedades termodinámicas del agua y del refrigerante R134a que se utilizaron para el desarrollo de los cálculos. Estas se obtuvieron mediante el uso de la base de datos CoolProp (Open-Source) implementada en un código desarrollado en Python. Por otra parte, la Figura 21 y la Tabla 11 muestra los parámetros geométricos del intercambiador.

**Tabla 9***Propiedades termodinámicas del agua a temperatura de entrada 25[°C]*

<b>Símbolo</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$\rho_{agua}$	Densidad	997	$kg/m^3$
$Cp_{agua}$	Calor específico	4.180	$kJ/kg \cdot ^\circ C$
$\mu_{agua}$	Viscosidad dinámica	0.891E-3	$kg/m \cdot s$
$Pr_{agua}$	Numero de Prandt	6.14	---
$K_{agua}$	Conductividad Térmica	0.607	$W/m \cdot ^\circ K$

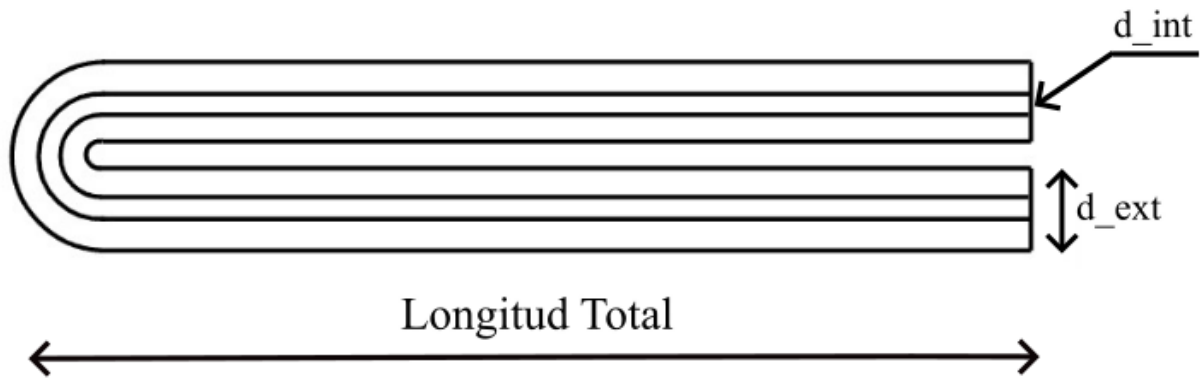
*Nota.* Adaptado de: Autores.**Tabla 10***Propiedades termodinámicas del R134a  $T_{suc\_comp} = 19,50[^\circ C]$  y  $h_{[4]} = 268,2 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$* 

<b>Símbolo</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$\rho_{R134a}$	Densidad	12.23	$kg/m^3$
$\mu_{R134a}$	Viscosidad	1.16E-5	$kg/m \cdot s$
$Pr_{R134a}$	Numero de Prandt	0.7533	-----
$k_{R134a}$	Conductividad termica	0.01368	$W/m \cdot ^\circ K$

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 21**

*Sección transversal intercambiador de calor de doble tubo*

**Tabla 11**

*Parámetros geométricos intercambiador de doble tubo*

Símbolo	Concepto	Valor	Unidad
$\varnothing_{Int}$	Diámetro interno	4	mm
$\varnothing_{Ext}$	Diámetro exterior	19	mm
$\varnothing_{Anular}$	Diámetro Anular	15	mm
$L_{Intercambiador}$	Longitud total Intercambiador	66	cm

*Nota.* Adaptado de: Autores.

A partir de estos datos, se determina el flujo másico del agua y su capacidad calorífica mediante la ecuación 2 y ecuación 3.

$$\dot{m}_{agua} = \rho_{agua} * Q_{agua} \quad \text{Ecu. 2}$$

$$Cp_{agua} = \dot{m}_{agua} * cp_{agua} \quad \text{Ecu. 3}$$

Con estos resultados, es posible calcular la tasa de transferencia de calor asociada al agua, a partir de la diferencia de temperaturas de entrada y salida asociadas al agua en el intercambiador (Cengel Y. G., 2011). La expresión utilizada se muestra en la ecuación 4.

$$\dot{Q}_{Agua} = \dot{m}_{h2o} * cp_{Agua} (T_{sal_{Agua}} - T_{ent_{Agua}}) \quad \text{Ecu. 4}$$

Cabe mencionar que este valor resulta negativo, ya que el agua cede energía térmica al refrigerante, mientras que el R134a la recibe, presentando un balance energético opuesto tal como se evidencia en la ecuación 5.

$$\dot{Q}_{R134a} = -\dot{Q}_{Agua} \quad \text{Ecu. 5}$$

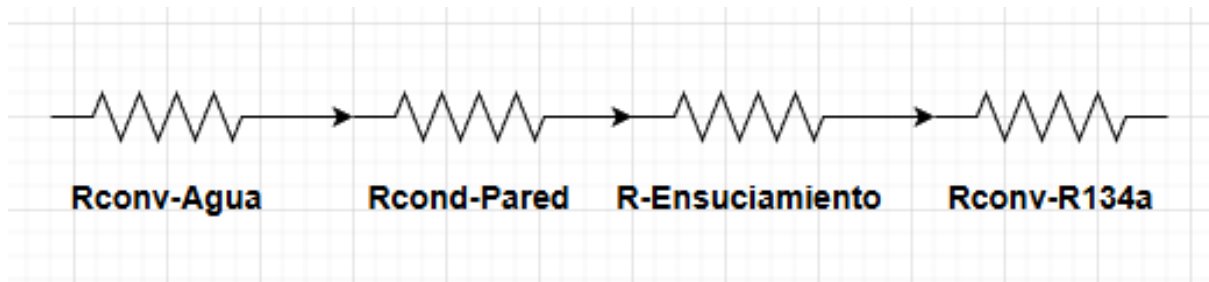
Por lo anterior se obtiene la tasa de transferencia de calor por calentamiento del R134a. También mediante las entalpías obtenidas ( $h_4$ ) y ( $h_3$ ) correspondiente a los estados de salida y entrada del refrigerante en el intercambiador para las condiciones de presión y temperatura dadas por los sensores y manómetros, se hace un el balance energético del R134a en el intercambiador, con el fin de hallar el flujo masico de refrigerante que circula por el sistema (Cengel Y. G., 2011). Todo esto a partir de la ecuación 6.

$$\dot{Q}_{R134a} = \dot{m}_{R134a} * (h_{[4]} - h_{[3]}) \quad \text{Ecu. 6}$$

El análisis térmico que se realizó tuvo en cuenta las cuatro resistencias principales: la conducción a través de la pared del tubo, la convección externa forzada del agua, el ensuciamiento causado por corrosión o depósitos. y la convección interna forzada del refrigerante tal como se muestra en la Figura 22 junto con el arreglo para la resistencia total de la ecuación 7.

**Figura 22**

Arreglo de Resistencia Total Intercambiador.



$$R_{Total} = R_{conv-Agua} + R_{cond-Pared} + R_{conv-R134a} + R_{Ensuciamiento} \quad \text{Ecu. 7}$$

Los coeficientes convectivos de la ecuación 8 se determinaron mediante las correlaciones empíricas según la condición de flujo, como: la correlación de Pethukov, Dittus Boelter y/o Gnieliski, las cuales dependen de los números adimensionales de Reynolds, Prandt y Nusselt (Cengel Y. G., 2011).

$$R_{Total} = \frac{1}{h_{convAgua} * A_{Anular}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2 * \pi * k * L} + \frac{1}{h_{convR134a} * A_{int}} + R_{Ensuciamiento} \quad \text{Ecu. 8}$$

Para realizar el análisis de la transferencia de calor por convección forzada interna del agua, (que tiene lugar en la región anular del intercambiador de calor), es necesario en primer lugar determinar el número de Reynolds (ecuación 9). Este parámetro adimensional permite caracterizar el régimen de flujo dentro del anillo hidráulico y, en consecuencia, establecer si el comportamiento del agua corresponde a un flujo laminar o turbulento (Cengel Y. G., 2011).

$$Re_{Agua} = \frac{\rho_{agua} * V_{agua} * \phi_{anular}}{\mu_{agua}} \quad \text{Ecu. 9}$$

Con base en el cálculo realizado, se determinó que para cuando el flujo es de 3,77[l/min] y la temperatura de entrada del agua es (25°C y 35°C) respectivamente. El régimen de flujo corresponde a turbulento, puesto que los números Reynolds oscilaron en

el rango de 6000 y 7500 tanto para el arreglo en paralelo como en el contraflujo. En contraste, cuando el flujo se redujo a 0,6962[l/min] el régimen de flujo tiene un comportamiento laminar registrándose números de Reynolds inferiores a 1400 para los dos arreglos. A partir de lo anterior, para el caso de régimen turbulento, el cálculo del factor de fricción se lleva a cabo mediante ecuación de Pethukov (ecuación 10).

$$f_{agua} = \frac{1}{\left(0,79 * \ln(Re_{agua} - 1,64)\right)^2} \quad \begin{array}{l} \text{Condicion:} \\ 3000 < Re < 5E + 10 \end{array} \quad \text{Ecu. 10}$$

El número de Nusselt para zona turbulenta se encuentra relacionado con el factor de fricción a través de la ecuación de Gnieliski (ecuación 11). Esta depende tanto del número de Reynolds como del Prandtl (Bengtson, 2010).

$$Nu_{Agua} = \frac{\left(\frac{f_{agua}}{8}\right) * (Re_{agua} - 1000) * Pr_{agua}}{1 + 12,7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} * (Pr_{Agua}^{0,66} - 1)} \quad \begin{array}{l} \text{Condicion:} \\ 0,5 < Pr < 2000 \\ 3000 < Re < 5E + 10 \end{array} \quad \text{Ecu. 11}$$

En los casos, donde se empleó un flujo laminar se utilizó la correlación de Siader-Tate (ecuación 12) la cual depende del diámetro anular, del Número de Prandtl, la longitud del intercambiador y de la relación de viscosidades correspondientes a la temperatura media del fluido  $\mu_b$  y a la de la pared (Bengtson, 2010).

$$Nu_{Agua} = 1,86 * \left(\frac{Re_{Agua} * Pr_{Agua} * \phi_{Anular}}{L_{totalIntercambiador}}\right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad \begin{array}{l} \text{Condicion:} \\ Re_{Agua} \\ < 2100 \end{array} \quad \text{Ecu. 12}$$

Una vez determinados los números de Nusselt, se procede a calcular los coeficientes de transferencia de calor convectivos y las resistencias térmicas correspondientes. Por medio de las ecuación 13 y ecuación 14.

$$h_{convAgua} = \frac{Nu_{Agua} * k_{agua}}{\phi_{Anular}} \quad \text{Ecu. 13}$$

$$R_{conv-Agua} = \frac{1}{h_{conv_{Agua}} * A_{Anular}} \quad \text{Ecu. 14}$$

El cálculo de la resistencia térmica por conducción fue determinado utilizando los parámetros geométricos presentados en la Tabla 11: longitud total del intercambiador, la conductividad térmica del material (cobre) y los diámetros interno y externo del tubo (ver ecuación 15).

$$R_{Cond} = \frac{Ln\left(\frac{\phi_{Ext}}{\phi_{Int}}\right)}{2 * \pi * k_{Cobre} * L_{Intercambiador}} \quad \text{Ecu. 15}$$

Para el estudio de la convección interna forzada del refrigerante R134a en el intercambiador de calor, se deben identificar los distintos regímenes de operación que experimenta el fluido. Dado que el refrigerante atraviesa más de una fase durante su recorrido, es necesario determinar la longitud a la cual ocurre la transición de fase, con el propósito de describir adecuadamente los fenómenos de transferencia de calor involucrados y asegurar la correcta caracterización del proceso. Con este propósito, se inicia el análisis en la región en la cual el refrigerante se encuentra en zona de sobrecalentamiento, dado que para esta condición se conoce los parámetros necesarios para poder calcular el coeficiente de convección en dicha zona (ver Tabla 10 y Tabla 11).

Se empleó la ecuación modificada del Número de Reynolds (ecuación 16), adaptada para los casos en los que se dispone el flujo masico del refrigerante como variable de entrada, junto con la viscosidad del R134 y el diámetro interior del intercambiador (Bengtson, 2010).

$$Re_{R134a} = \frac{4 * \dot{m}_{R134a}}{\pi * \phi_{Int} * \mu_{R134a}} \quad \text{Ecu. 16}$$

Lo anterior nos da, un régimen de flujo turbulento ( $Re_{R134a} > 10000$ ) para ambos modos de operación, por lo cual se utiliza la ecuación de Dittus Boelter (ecuación

17) para hallar el número de Nusselt teniendo en cuenta que para este caso el fluido se encuentra en calentamiento, por ende, se considera un  $n = 0.4$  (Cengel Y. G., 2011).

$$Nu_{R134a} = 0,023Re_{R134a}^{0.8}Pr_{R134a}^n \quad \begin{matrix} 0.7 < Pr < 160 \\ Re > 10.000 \end{matrix} \quad \text{Ecu. 17}$$

A través del número de Nusselt, el diámetro interno y la conductividad térmica del R134a para las condiciones de sobrecalentamiento se puede calcular el coeficiente de convección para dicha zona por medio de la ecuación 18.

$$hconv_{R134a-Monofasico} = \frac{Nu_{R134a} * k_{R134a}}{\phi_{Int}} \quad \text{Ecu. 18}$$

Conociendo el coeficiente de convección interno para el R134a y su área interior de intercambio térmico la cual se encuentra determinada por el diámetro interior y la longitud del intercambiador. Se calculo la resistencia térmica por convección para la zona monofásica utilizando la ecuación 19.

$$Rconv_{R134a-Monofasico} = \frac{1}{hconv_{R134a-Monofasico} * A_{Int}} \quad \text{Ecu. 19}$$

El factor de incrustación  $R_f$  representa la resistencia térmica adicional a depósitos o ensuciamientos sobre las superficies del intercambiador tal como se evidencia en la ecuación 20.

$$R_f = \frac{1}{U_{Experimental}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad \text{Ecu. 20}$$

De acuerdo con lo anterior, mediante los coeficientes convectivos correspondientes al agua y al refrigerante R134a para la región monofásica, junto con el espesor de la pared y la conductividad térmica del material del intercambiador, se determina el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias  $U_{limpio}$  mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U_{limpio}} = \frac{1}{h_{conv_{R134a-Monofasico}}} + \frac{1}{h_{conv_{agua}}} + \frac{\delta_t}{k_{Cobre}} \quad \text{Ecu. 21}$$

Posteriormente, considerando las resistencias térmicas individuales asociadas a cada mecanismo de transferencia se determinó una resistencia térmica total aproximada para la zona monofásica a partir de la ecuación 22.

$$R_{total_{Aprox}} = R_{conv_{R134a-Monofase}} + R_{Cond} + R_{conv_{Agua}} \quad \text{Ecu. 22}$$

A partir de la resistencia total aproximada y del área de intercambio térmico correspondiente al interior del tubo, se estableció el coeficiente global de transferencia de calor para la región monofásica. Este parámetro se determinó mediante la ecuación 23.

$$U_{monofasico} = \frac{1}{R_{total_{Aprox}} * A_{Int}} \quad \text{Ecu. 23}$$

El coeficiente de transferencia de calor experimental  $U_{Experimental}$  para las condiciones de ensuciamiento se aproxima al coeficiente monofásico  $U_{monofásico}$  calculado por el arreglo de resistencias térmicas presentes en el intercambiador.

$$U_{Experimental} \cong U_{Monofasico} \quad \text{Ecu. 24}$$

Considerando lo anterior se retoma la expresión de la ecuación 22 para recalculer la resistencia total en el intercambiador teniendo en cuenta el factor de incrustación  $R_f$  junto con el coeficiente de transferencia de calor monofásico ( $U_{monofásico}$ ).

$$R_{total_{Aprox}} = R_{conv_{R134a-Monofase}} + R_{Cond} + R_{conv_{Agua}} + R_f \quad \text{Ecu. 25}$$

Ahora, para determinar la longitud del tramo en el cual el refrigerante se encuentra en zona de evaporación dentro del intercambiador, es necesario recordar los dos posibles esquemas de operación del intercambiador: flujo en paralelo (ver Figura 23) y contraflujo (ver Figura 24). En cada caso, la definición de las diferencias de temperaturas extremas

que intervienen en el cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica (ecuación 26) se modifica en función del régimen de operación considerado (Cengel Y. G., 2011).

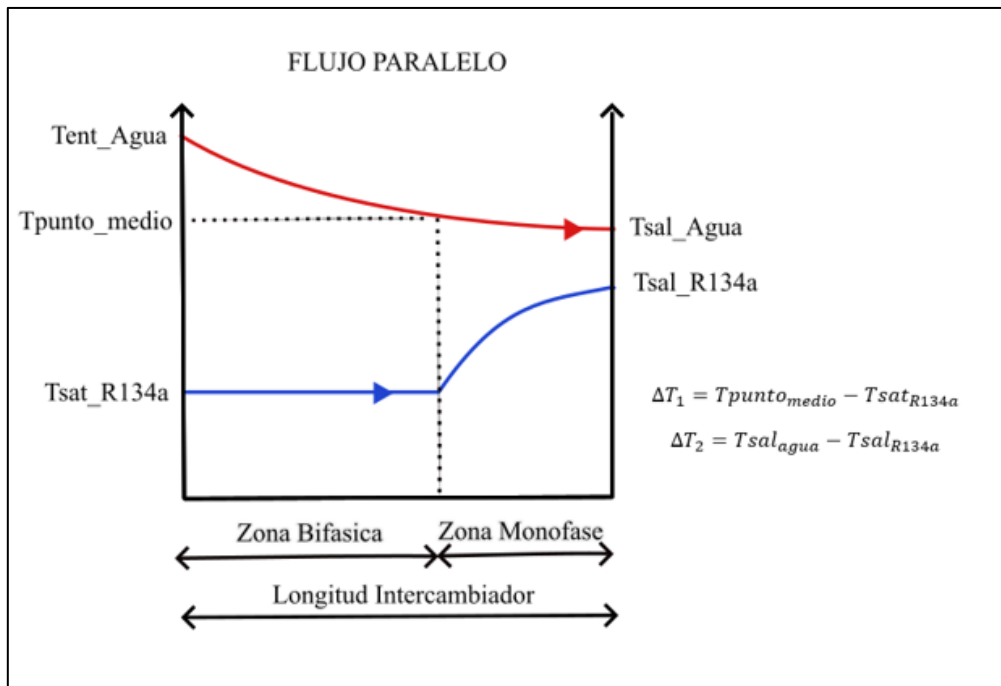
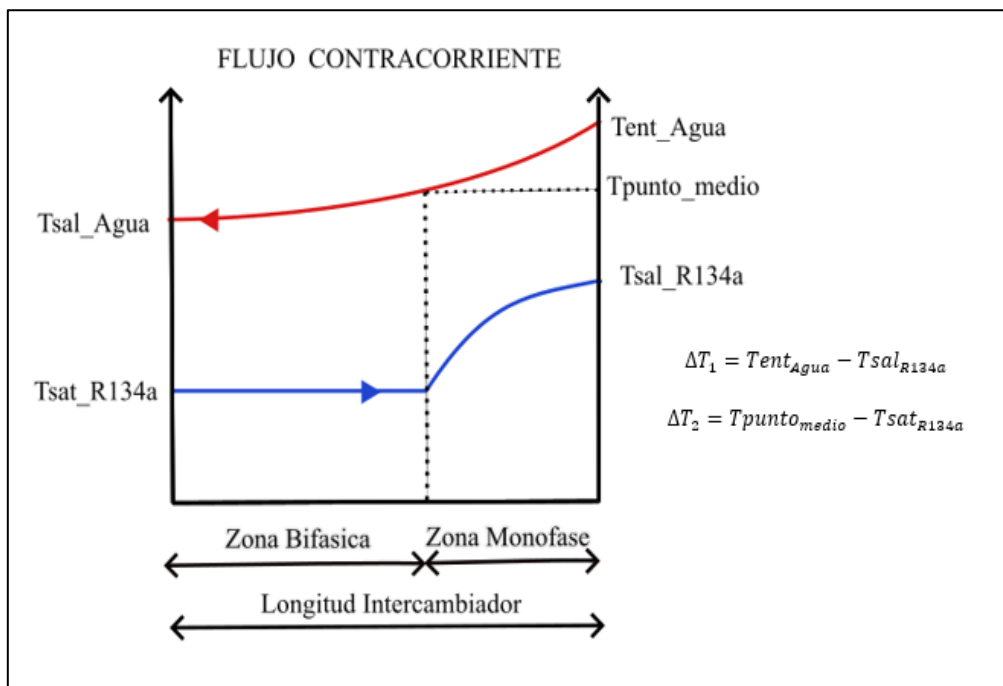
$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Ecu. 26}$$

Posteriormente, se emplea la ecuación 27 para calcular la transferencia de calor sensible en la región monofásica, considerando que el flujo másico de R134a se mantiene constante a lo largo de todo el proceso. Para este cálculo se utiliza la entalpía de vapor saturado ( $h_g$ ) correspondiente a la temperatura de saturación ( $T_{sat_{r134a}}$ ) la cual tiene un valor  $-3$  °C y es constante desde la entrada del refrigerante en el intercambiador hasta cuando este termina el proceso de evaporización en la zona bifásica. A partir de este punto todo aporte adicional de calor provoca sobrecalentamiento del refrigerante, hasta alcanzar el estado h [4], caracterizado por su condición de vapor sobrecalentado a la salida del intercambiador indicado por la presión del manómetro y la lectura de temperatura del sensor.

$$\dot{Q}_{sensible_{R134}} = \dot{m}_{R134a} * (h_{[4]} - h_g) \quad \text{Ecu. 27}$$

Teniendo la transferencia de calor sensible, el coeficiente global de transferencia de calor, junto con la diferencia de temperatura media logarítmica es posible hallar la longitud en la región monofásica con la ecuación 28 la cual incluye la longitud dentro del área superficial.

$$L_{mono-fase} = \frac{Q_{sensible_{R134a}}}{LMTD * \pi * \phi_{Int} * U_{Monofasico}} \quad \text{Ecu. 28}$$

**Figura 23***Esquema de régimen Paralelo***Figura 24***Esquema de Régimen en contracorriente*

De manera análoga, para la longitud bifásica se utiliza la ecuación 29, la cual involucra la diferencia entre longitud total del intercambiador y la longitud asociada a la zona de monofase.

$$L_{Bifasica} = L_{total} - L_{Mono-fase} \quad \text{Ecu. 29}$$

Antes de aplicar la correlación de Gungor–Winterton para estimar el coeficiente de la zona bifásica ( $h_{tp,i(mezcla)}$ ), es importante señalar que esta aproximación considera el flujo bifásico como la combinación de dos contribuciones: una asociada a la fase líquida ( $h_{liq,i}$ ) y otra a la fase de vapor ( $h_{nb}$ ). Cada una de estas fases depende de parámetros característicos tales como el Numero de Boiling, el flujo masico superficial, el parámetro de Martinelli Modificado entre otros (Bengtson, 2010).

Para el análisis de la fase líquida, la calidad de entrada ( $X_{in}$ ) se determina mediante la relación entre la diferencia de entalpias del refrigerante y el calor latente de vaporización. En este caso se utiliza la expresión de la ecuación 30:

$$X_{in} = \frac{h_{[3]} - h_{liquido}}{h_{fg}} \quad \text{Ecu. 30}$$

Donde  $h_{[3]}$  corresponde a la entalpia del refrigerante después del tubo capilar,  $h_{liquido}$  es la entalpia del líquido saturado a la presión absoluta de baja y  $h_{fg}$  representa el calor latente de vaporización para la zona bifásica.

Con la calidad de entrada, el flujo masico de refrigerante y la entalpia de vaporización se calcula la tasa de transferencia de calor para dicha región por medio de la ecuación 31.

$$\dot{Q}_{Bifasico} = \dot{m}_{R134a} * h_{fg} * (1 - X_{in}) \quad \text{Ecu. 31}$$

Para la calidad de salida  $X_{Out}$  en la región bifásica del intercambiador, se realiza a partir del balance energético, considerando la energía absorbida por el refrigerante a lo largo del tramo. Matemáticamente se expresa como:

$$X_{Out} = X_{in} + \frac{\dot{Q}_{Bifasico}}{\dot{m}_{R134a} * h_{fg}} \quad \text{Ecu. 32}$$

La ecuación 32 permite cuantificar el incremento en la fracción másica de vapor entre la entrada y la salida del tramo bifásico del intercambiador. Este análisis describe como el refrigerante progresa en su proceso de vaporización a medida que absorbe calor en esta zona. Al final del tramo bifásico el refrigerante alcanza su cambio de fase lo cual garantiza el equilibrio energético y el correcto funcionamiento del sistema (Bengtson, 2010).

Por otra parte, se halló el flujo de calor lineal ( $q_{lineal}$ ) el cual representa la cantidad de energía transferida por unidad de longitud en el intercambiador. Este parámetro se obtiene al dividir la tasa de calor asociada a la zona bifásica ( $\dot{Q}_{Bifasico}$ ) entre el área de transferencia interna. Lo cual se evidencia en la ecuación 33.

$$q_{lineal} = \frac{\dot{Q}_{bifasico}}{\pi * \phi_{int} * L_{bifasica}} \quad \text{Ecu. 33}$$

Este valor es clave; ya que permite evaluar la intensidad del flujo térmico que actúa directamente sobre el refrigerante en el proceso de transición de fase.

El parámetro de Martinelli modificado ( $X_{tt-i}$ ), combina la calidad de entrada y salida en una calidad promedio ecuación 34 en la región bifásica del refrigerante, junto con las propiedades de la fase líquida y vapor evidenciadas en la Tabla 12. Este parámetro se define por medio de la ecuación 35.

$$X_{prom} = \frac{X_{in} + X_{out}}{2} \quad \text{Ecu. 34}$$

$$X_{tt-i} = \left( \frac{1 - X_{prom}}{X_{prom}} \right)^{0,9} * \left( \frac{\rho_{vapor}}{\rho_{liquido}} \right)^{0,5} * \left( \frac{\mu_{liquido}}{\mu_{vapor}} \right)^{0,1} \quad \text{Ecu. 35}$$

A continuación, se determina el flujo másico superficial ( $G$ ), el cual se define en función del caudal másico de refrigerante y del área interna de paso en el tubo. Este parámetro se expresa en la ecuación 36.

$$G_{superficial} = \frac{\dot{m}_{R134a}}{A_{seccion}} \quad \text{con} \quad A_{seccion} = \frac{\pi}{4} \phi_{int}^2 \quad \text{Ecu. 36}$$

Con el flujo masico superficial y la tasa de transferencia de calor lineal ( $q_{lineal}$ ) se establece el número de Boiling (ecuación 37), que representa la relación entre el calor transferido y la energía necesaria para generar cambio de fase.

$$B_0 = \frac{q_{lineal}}{G_{superficial} * h_{fg}} \quad \text{Ecu. 37}$$

Adicionalmente, se calculó el Reynolds para la fase líquida por la ecuación 38, cuyo valor se ubicó dentro de la región laminar. Bajo esta condición, y de acuerdo con la teoría de transferencia de calor para regiones de flujo laminar completamente desarrollado se adoptó un número de Nusselt constante a 3,66 lo cual permitió estimar el coeficiente convectivo del líquido mediante la ecuación 39 (Arvizu, 2001).

$$Re_{Liquido} = \frac{(G_{superficial} * (1 - X_{prom}) * \phi_{int})}{\mu_{Liquido}} \quad \text{Ecu. 38}$$

$$h_{liq,i} = \frac{Nusselt_{aprox} * k_{liq}}{\phi_{int}} \quad \text{Ecu. 39}$$

**Tabla 12**

*Componentes del coeficiente de transferencia de calor para la región bifásica del R134a a la presión absoluta de Baja.*

<b>Símbolo</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$h_{nb}$	Coeficiente de transferencia de calor nucleado	-----	$W/m^2 \cdot ^\circ K$
$g$	Aceleración Gravitacional	9.81	$m/s^2$
$\rho_l$	Densidad del liquido	1300.85	$kg/m^3$
$\rho_v$	Densidad del vapor	13.52	$kg/m^3$
$\mu_l$	Viscosidad del liquido	2.72E-4	$kg/m \cdot s$
$\sigma$	Tensión superficial	0.011687	$N/m^2$
$Cp_l$	Calor específico del liquido	1336.07	$J/kg \cdot ^\circ K$
$k_l$	Conductividad térmica del liquido	0.092835	$W/m \cdot ^\circ K$
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización	199.99	$kJ/kg$
$\ddot{q}_{lineal}$	Tasa de transferencia de calor lineal	-----	$kW/m^2$

*Nota.* Adaptado de: Autores.

Como se había mencionado anteriormente para la fase de vapor el coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h_{nb}$ ) se estima mediante la ecuación 40 de Forster-Zuber en la cual los componentes para esta expresión se explican en la Tabla 12. También se presenta el valor de algunas de las propiedades consideradas (Bengtson, 2010).

$$h_{nb} = 0,00122 * \left( \frac{k_l^{0.79} C_{p,l}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_v^{0.24}} \right) * [g * (\rho_l - \rho_v)]^{0.24} * \ddot{q}_{lineal}^{0.79} \quad \text{Ecu. 40}$$

Considerando los fenómenos de transferencia de calor indicados en las ecuaciones anteriores, se empleó la correlación de Gungor-Wintertor la cual incorpora las variables descritas anteriormente (Bengtson, 2010). Esta correlación permite estimar el coeficiente convectivo total en la zona de mezcla dado por la ecuación 41.

$$h_{tp,i(mezcla)} = h_{liq,i} * [1 + 3000B_0^{0.86} + 1,12X_{tt,i}^{0.75}] + 1,12h_{nb} \quad \text{Ecu. 41}$$

Conociendo el coeficiente convectivo para la zona de mezcla, se calculó el valor de la resistencia por convección empleando la ecuación 42.

$$R_{convR134a} = \frac{1}{h_{tp,i(mezcla)} * A_{Int}} \quad \text{Ecu. 42}$$

Se retoma la expresión de la resistencia total (ecuación 8) incorporando el coeficiente convectivo calculado por la ecuación de Gungor-Wintertor para de esta forma recalculer el coeficiente global de transferencia de calor ( $U_{Total}$ ) expresado en la ecuación 43.

$$U_{Total} = \frac{1}{R_{Total} * A_{Int}} \quad \text{Ecu. 43}$$

El número de unidades de transferencia (NTU), está definido en función del área de intercambio térmico, la capacidad calorífica mínima y el coeficiente global de transferencia de calor anteriormente calculado. Tal como se presenta en la ecuación 44.

$$NTU = \frac{U_{Total} * A_S}{C_{min}} \quad \text{Ecu. 44}$$

En este caso, la capacidad calorífica mínima corresponde al agua; dado que el refrigerante dentro del intercambiador se encuentra en régimen bifásico, lo que implica que la relación de capacidades caloríficas es igual a cero 0. Bajo esta condición particular la efectividad del intercambiador para la zona bifásica se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{Bifasico} = 1 - e^{(-NTU)} \quad \text{Ecu. 45}$$

En contraste, para la zona monofásica, la capacidad calorífica mínima ( $C_{min}$ ) corresponde al refrigerante, dado que en este tramo actúa como el fluido con menor capacidad térmica para absorber o liberar energía. En consecuencia, la determinación de

la efectividad en esta región se realiza empleando la relación de capacidades establecida a partir de la ecuación 46.

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \text{Ecu. 46}$$

Bajo estos criterios se definen las expresiones empleadas para calcular la efectividad en dicha zona dependiendo de la configuración establecida en el banco.

$$\varepsilon_{monofasico} = \frac{1 - e^{-NTU(1+c)}}{1 + c} \quad (\text{Paralelo}) \quad \text{Ecu. 47}$$

$$\varepsilon_{monofasico} = \frac{1 - e^{-NTU(1-c)}}{1 - ce^{-NTU(1-c)}} \quad (\text{Contraflujo}) \quad \text{Ecu. 48}$$

### 3.6 Desarrollo de la interfaz Python

#### 3.6.1 Interfaz Python

Para el desarrollo de la interfaz en Python, fue necesario la implementación de diversas librerías, las cuales permitieron optimizar tanto la gestión de datos como la comunicación con el hardware y la creación de entornos gráficos interactivos. Cada una de las librerías cumple una función específica dentro de la interfaz. La Tabla 13 las librerías utilizadas, su función principal y la forma en la que fueron aplicadas dentro del código.

**Tabla 13**

*Librerías utilizadas en la interfaz*

Librería	Función Principal	Aplicación en el Código
pandas(pd)	Manejo/almacenamiento de datos en estructuras dataframe	Guarda lectura en Archivo Excel

threading	Ejecuta varios procesos en paralelo (Hilos)	Lectura continua de datos del Arduino
datetime	Manejo de fechas y horas	Registra el tiempo de cada lectura (Sensores)
tkinter(tk)	Creación de interfaces Graficas en Python	Ventana Principal e ingreso manual datos
tkinter.ttk	Widgets avanzados de tkinter	Menú desplegable para seleccionar Acciones
tkinter.messagebox	Ventanas emergentes de aviso, error o confirmación	Mostrar mensajes de guardado exitoso o error
matplotlib.pyplot	Creación de Gráficos	Grafica de temperaturas sensores tiempo real
matplotlib.backends.backend_tkagg	Integración de gráficos en Tkinter.	Insertar grafico
os	Operaciones del sistema (archivos y rutas)	Verifica la existencia de archivos(os.path)
json	Lectura y escritura de archivos json	Carga formulas y configuraciones desde formulas.json
math	Funciones matemáticas estándar	Evaluación de fórmulas logarítmicas y potencias
serial(pyserial)	Comunicación serial con Arduino	Lectura de datos desde el puerto "COM"
CoolProp.CoolProp (CP)	Cálculos de propiedades termodinámicas de fluidos	Determinar entalpia, conductividad, viscosidad de los fluidos etc.
re	Expresiones Regulares para búsqueda y validación	Extraer valores numéricos de cadenas
numpy	Operaciones matemáticas avanzadas y manejo arreglos	Generación de datos curva de saturación Mollier

---

### ***3.6.2 Diagrama de flujo de la GUI***

El diagrama de flujo presentado en la Figura 25 ilustra de manera estructurada la lógica de funcionamiento del código desarrollado para la interfaz gráfica del banco de pruebas de intercambiadores de calor de tubos concéntricos. Este diagrama describe el proceso completo desde la inicialización del sistema que incluye la importación de módulos, configuración de variables y apertura del puerto serial hasta la ejecución del bucle principal de la interfaz (GUI) construida en Tkinter. En él se detallan las decisiones y operaciones que permiten la interacción entre el usuario y el sistema, como la lectura y almacenamiento de datos provenientes del Arduino, el cálculo de propiedades termodinámicas mediante CoolProp, la evaluación de fórmulas automáticas en formato JSON y la visualización gráfica de resultados en tiempo real.

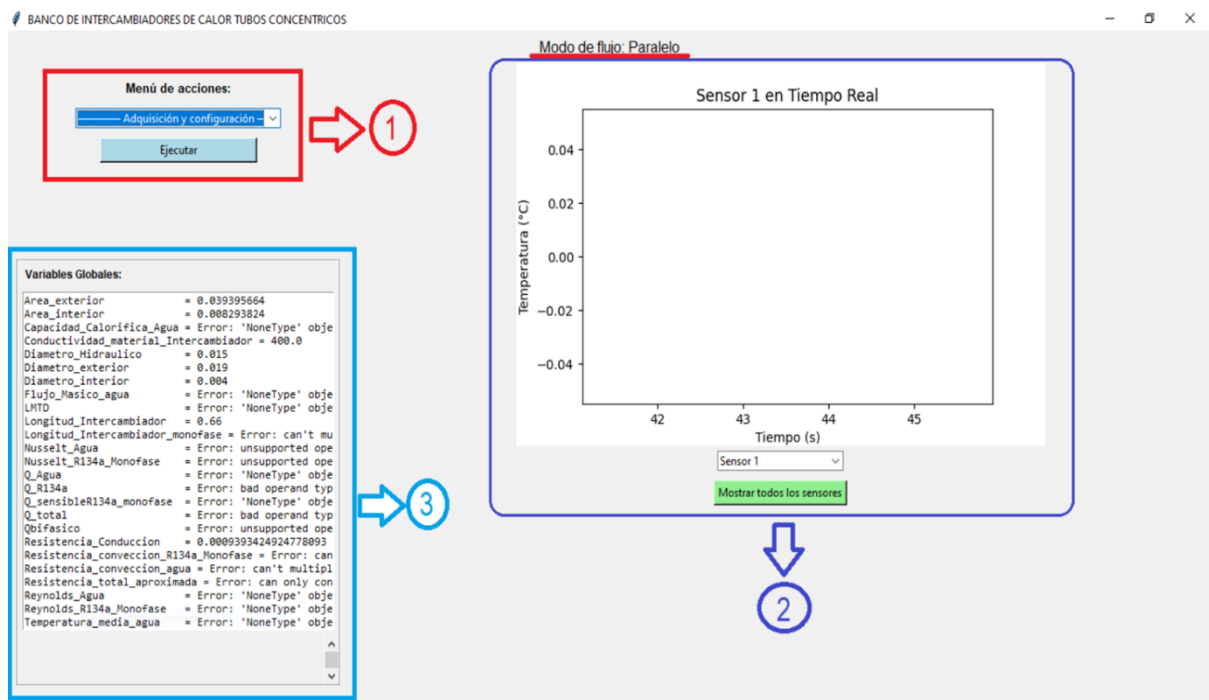
### ***3.6.3 Panel de control de la interfaz***

El panel de control de la interfaz gráfica (GUI) constituye el núcleo operativo del sistema, permitiendo al usuario interactuar de manera directa con el banco de pruebas. A través de esta interfaz se gestionan las principales funciones del programa, como la adquisición y visualización de datos provenientes de los sensores, el cálculo de propiedades termodinámicas mediante CoolProp y la evaluación de las fórmulas almacenadas en formato JSON. Su diseño se centra en la facilidad de uso y en la organización lógica de las herramientas, de modo que el usuario pueda acceder de forma rápida y segura a cada módulo del sistema.



Figura 26

## Panel de control Interfaz GUI



En el panel central (2) se visualiza el gráfico en tiempo real correspondiente a la temperatura registrada por el sensor activo. Este gráfico se actualiza dinámicamente conforme se reciben los datos desde la placa de Arduino. También cuenta con el botón “Mostrar todos los sensores”, que habilita la visualización simultánea de las curvas de temperatura de todos los sensores conectados, facilitando el análisis comparativo del comportamiento térmico en las distintas posiciones del banco de pruebas. Adicionalmente, la interfaz dispone de un panel de almacenamiento de variables (3), en el cual el usuario puede visualizar en tiempo real los datos registrados durante la ejecución de cada acción. Estos valores se actualizan de forma automática a medida que se realizan las operaciones desde el panel principal de la interfaz. Todo esto se aprecia en la Figura 26.

## 4. Análisis y resultados

### 4.1 Resultados de los experimentos

A continuación, se presenta el análisis y resultados de las pruebas experimentales para el banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos desarrolladas.

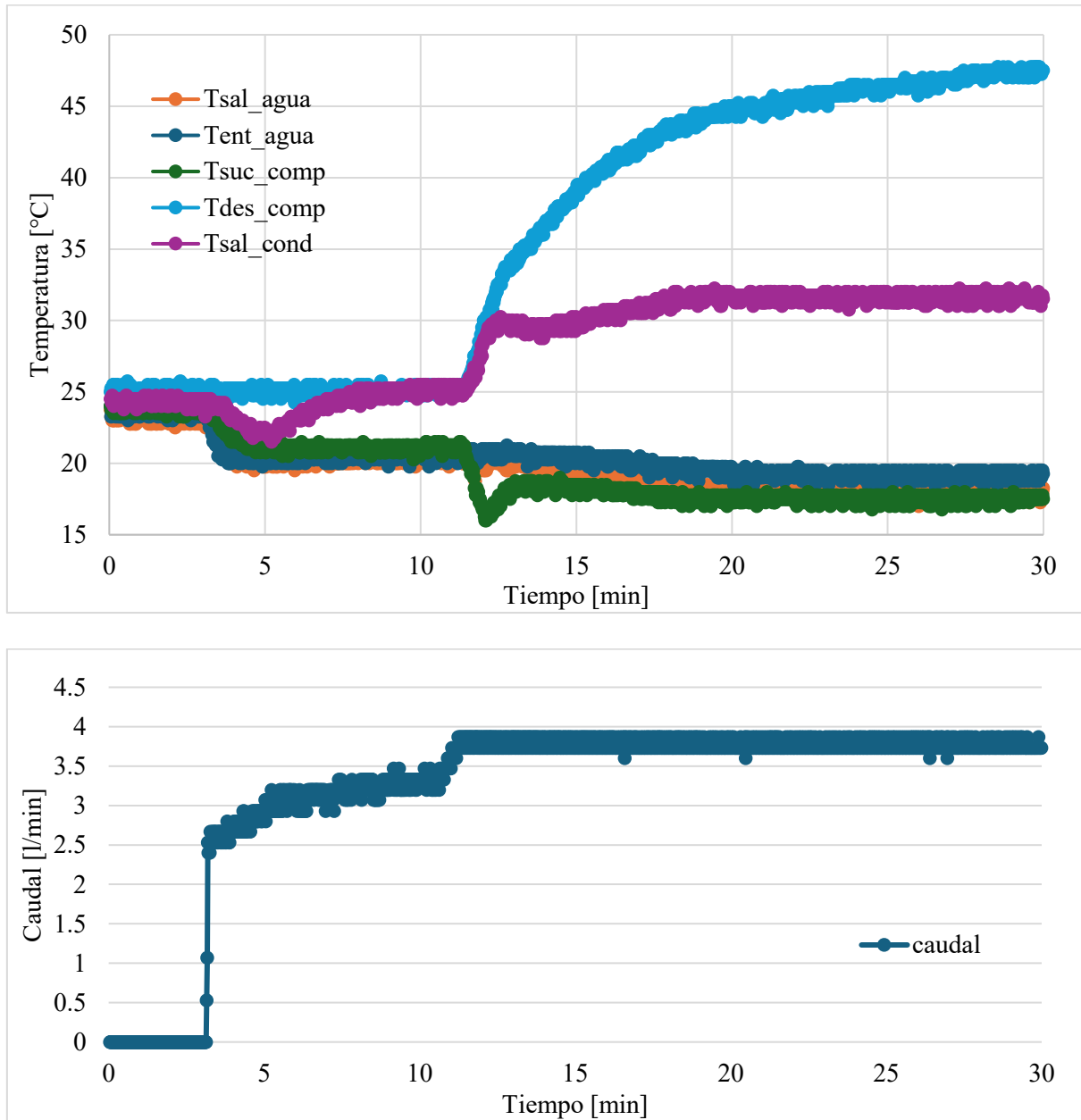
#### 4.1.1 *Análisis de comportamiento estacionario*

La Figura 27 y la Figura 28 presentan el comportamiento estacionario para las pruebas a temperatura de 15°C, con caudal de 3.775 [l/min] en flujo paralelo y flujo contracorriente respectivamente. Todas las pruebas presentaron una buena reproducibilidad confirmando una correcta ejecución de la metodología.

En la Figura 27 y Figura 28 se contempla como, al iniciar la circulación de agua por el sistema, los sensores de  $T_{ent\_agua}$  y  $T_{sal\_agua}$  empiezan a desplazar sus valores de temperatura ambiente a la del fluido. A partir de estos sensores, se comprueba que con un caudal de 3.775 [l/min] apenas se aprecia una variación en la entrada y salida del agua para ambas configuraciones de flujo, siendo en contraflujo levemente más pronunciada, como se esperaba. En ambas figuras se aprecia como a los 20 minutos el sistema alcanza su régimen estacionario y se mantiene en el tiempo. El caudal registrado coincide con la referencia tomada en la metodología.

**Figura 27**

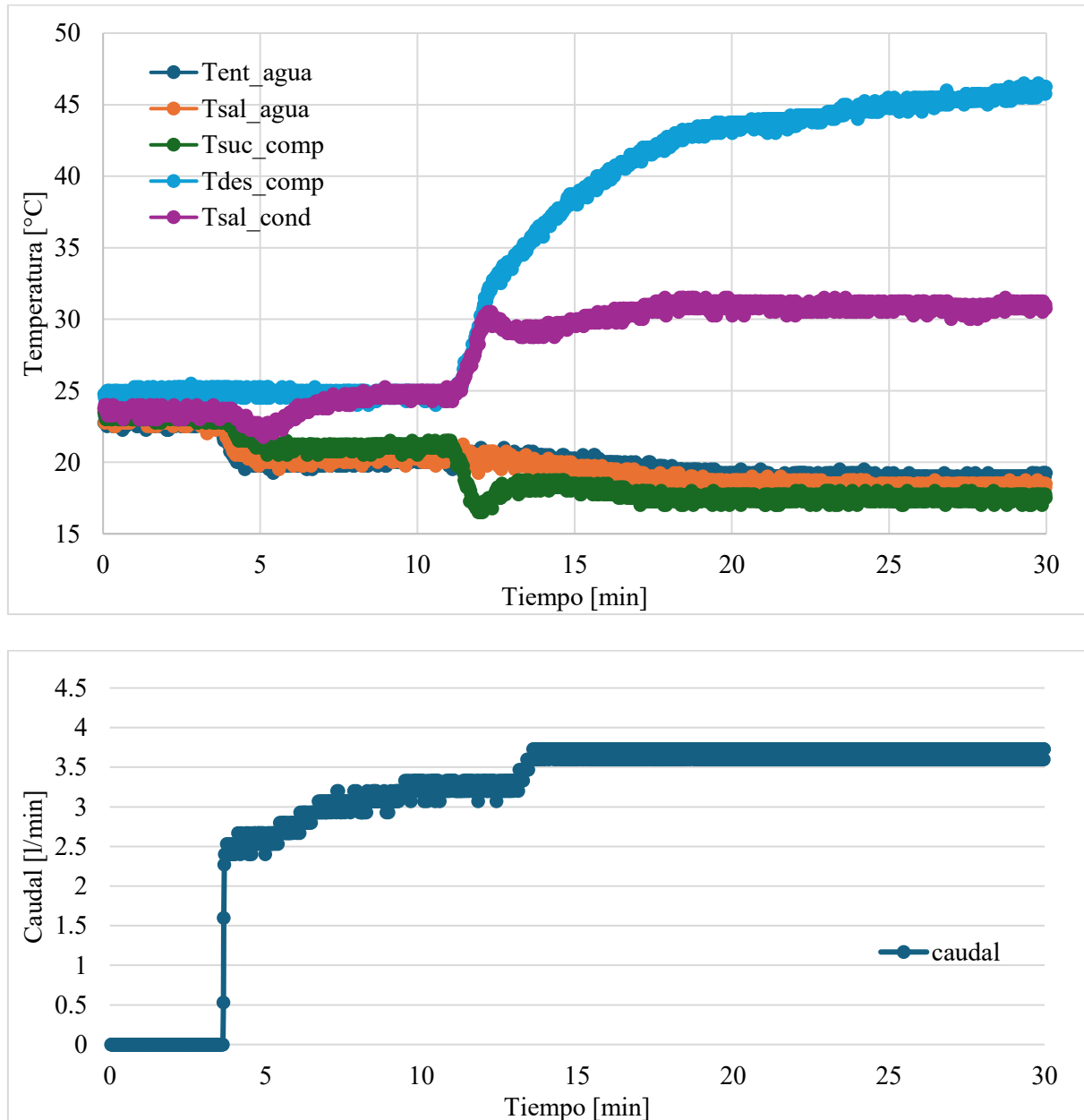
*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo*



*Nota.* Como se manifestó en la metodología estas graficas son para determinar el comportamiento estacionario del sistema.

**Figura 28**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo contracorriente*

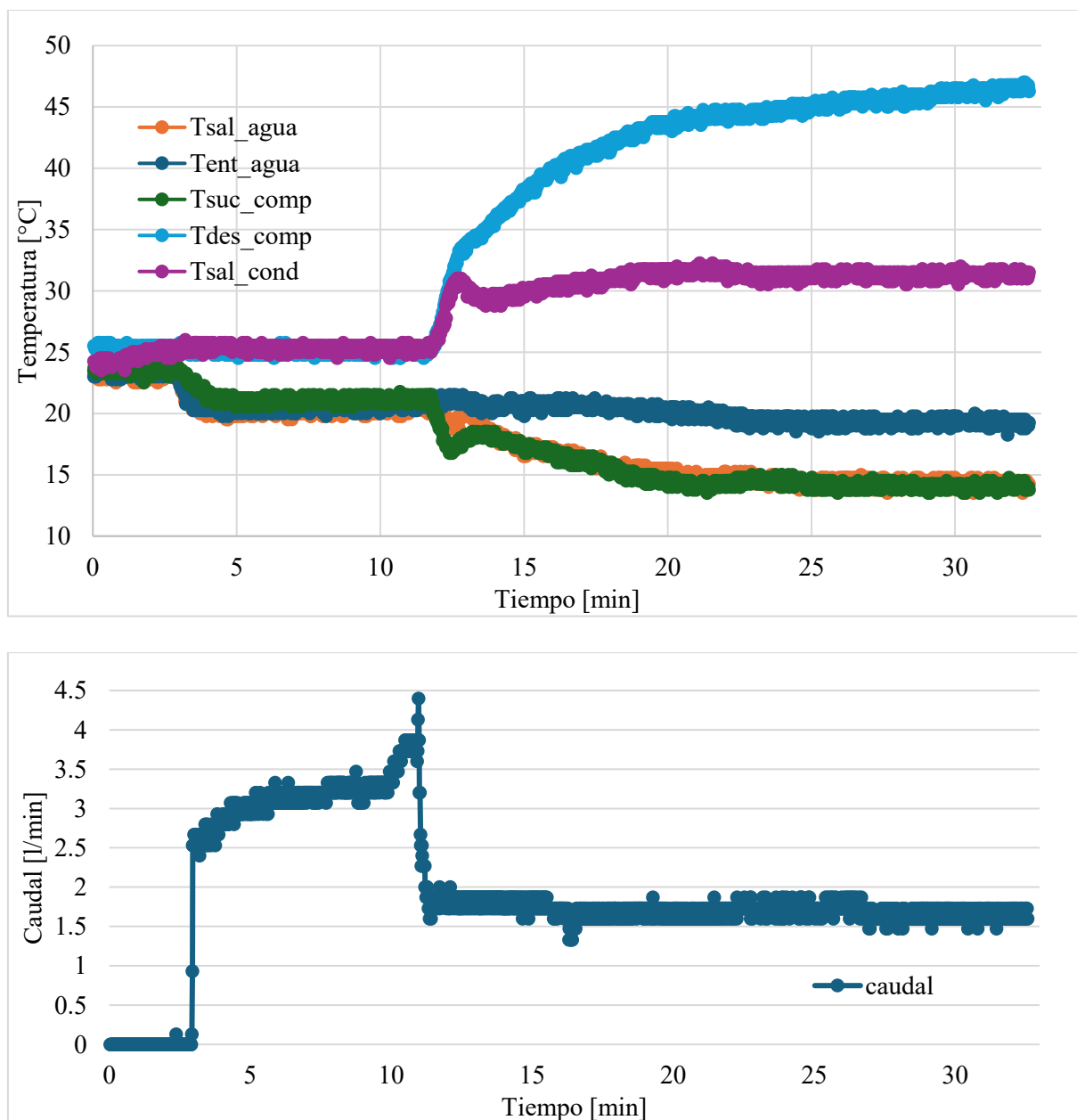


En la Figura 29 y Figura 30 se observa como la reducción del caudal modifica significativamente el comportamiento en el intercambiador de calor. El caudal de captado coincide con el asumido en la metodología, con ello confirmamos el trabajo en reproducibilidad. Al igual que en los casos anterior a los 20 minutos se estabiliza.

Comparando las configuraciones en paralelo y contraflujo se aprecia en mayor magnitud que el flujo a contracorriente alcanza menor temperatura, correspondiente a lo esperado. Este comportamiento se evidencia en las 12 configuraciones (ver Tabla 7) y cada uno de los experimentos hechos a lo largo de la práctica.

**Figura 29**

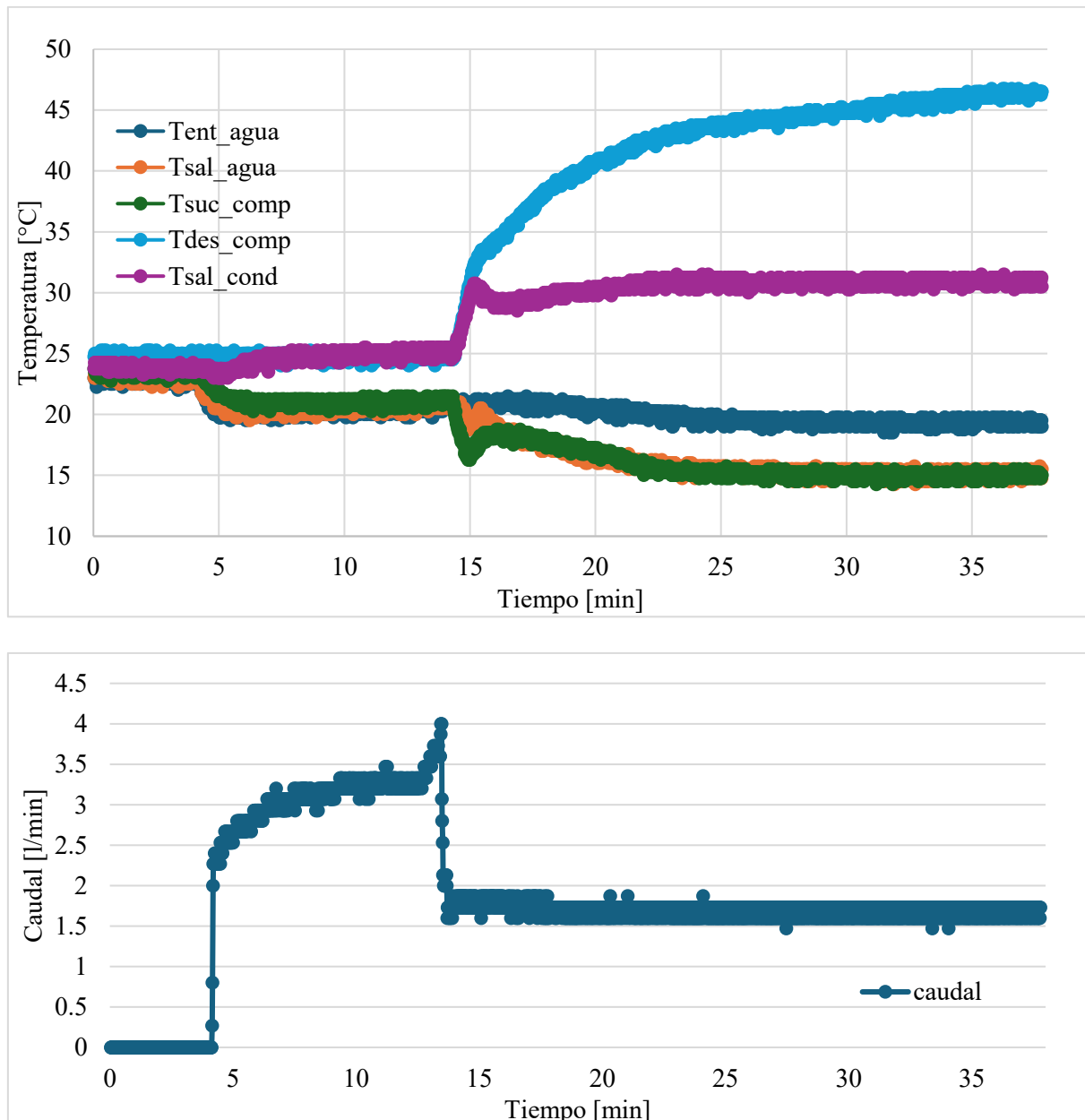
*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo*



*Nota.* Como se manifestó en la metodología estas graficas son para determinar el comportamiento estacionario del sistema.

**Figura 30**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente*



*Nota.* Como se manifestó en la metodología estas graficas son para determinar el comportamiento estacionario del sistema.

Las figuras Figura 27, Figura 28, Figura 29, y Figura 30, son las muestras de datos de las pruebas P2CAT15P, P2CAT15C, P2CCT15P y P1CCT15C, respectivamente (ver Tabla 7). Por ello, se presenta la Tabla 14 las temperaturas obtenidas y el rango tiempo donde se tomaron.

**Tabla 14**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación de la prueba P2CAT15P*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	17.87	19.19	17.51	46.31	31.62	3.75
<b>Valor. min</b>	17.00	18.50	16.75	44.25	30.75	3.60
<b>Valor. máx</b>	18.50	19.75	18.00	47.75	32.25	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.26	0.21	0.88	0.26	0.05
Rango 20 a 30 minutos						

*Nota.* Datos de la Figura 27. Adaptado de: Autores.

El análisis es el mismo que se realizó para las otras once (11) combinaciones experimentales. Es decir, su comportamiento es similar. Por lo tanto, estos resultados se presentan en el Apéndice B.

#### 4.2 Análisis modelo matemático

Las Tabla 15 y Tabla 16 presentan los resultados del modelo matemático para el banco de pruebas de intercambiadores de calor de tubos concéntricos bajo las dos configuraciones de flujo: paralelo y contracorriente, considerando los dos caudales de operación (0,6962[l/min] y 3,77[l/min]) y temperaturas las de referencia de 25[°C] y 35[°C]. Dicho análisis se centra en el estudio del comportamiento de los parámetros característicos de la transferencia de calor presentes en el banco, tales como la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD), el coeficiente global de transferencia de calor

( $U_{Total}$ ), la efectividad ( $\epsilon$ ), el número de Reynolds, la longitud de las zonas bifásicas y monofásicas presentes en el intercambiador.

En general, se observa que el aumento del caudal provoca un cambio significativo en el régimen de flujo del agua, pasando de condiciones laminares ( $Re < 2100$ ) a condiciones turbulentas ( $Re > 4000$ ). Lo cual según la teoría este cambio mejora notablemente la transferencia de calor, ya que la turbulencia intensifica la convección interna y reduce la resistencia térmica dentro del tubo. Por tanto, los valores del coeficiente de transferencia de calor total tienden a incrementarse especialmente para la configuración en paralelo.

Por otro lado, al aumentar la temperatura de referencia, se presenta un incremento del LMTD en ambas configuraciones de flujo y para ambos caudales. Este comportamiento se debe a la disminución de la viscosidad del agua y al aumento del coeficiente convectivo interno, los cuales favorecen el desarrollo del flujo. Asimismo, la diferencia de temperatura media logarítmica es más sensible al diferencial térmico de entrada entre los fluidos, aumentando así el potencial térmico disponible para la transferencia de energía.

**Tabla 15**

*Resultados para caudal  $Q=0.696$  [l/min]*

T [°C]	Flujo	L.Bifásica [cm]	L.Monofase [cm]	LMTD [°C]	$U_{Total}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	N.Reynolds Agua
25	Contraflujo	11.14	54.85	15.73	266.79	1170.07
25	Paralelo	2.7	63.29	11.95	264.04	1157.67
35	Contraflujo	15.3	50.69	20.45	278.61	1383.8
35	Paralelo	13.76	52.23	17.5	252,74	1367.18

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Tabla 16***Resultados para caudal  $Q=3.775$  [l/min]*

T[°C]	Flujo	L.Bifásica [cm]	L.Monofase [cm]	LMTD [°C]	$U_{Total}$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	N.Reynolds Agua
25	Contraflujo	13,58	52,41	14,20	224,29	6313,20
25	Paralelo	6,035	59,96	12,46	354,97	6384,70
35	Contraflujo	19,48	46,51	20,56	301,45	7532,03
35	Paralelo	18,86	47,13	20,06	298,92	7558,27

*Nota.* Adaptado de: Autores.

En cuanto a la distribución de las zonas, la longitud de las regiones monofásica y bifásica varía en función del régimen de flujo y de la configuración empleada. A caudal bajo (régimen laminar), la zona monofásica ocupa la mayor parte de la longitud del intercambiador, indicando que la transferencia de calor sensible domina sobre el proceso de cambio de fase. En contraste, a caudal alto (régimen turbulento), la zona bifásica tiende a ampliarse, especialmente en la disposición en contraflujo, donde la variación de temperatura a lo largo del tubo favorece un intercambio térmico más prolongado durante la evaporación del refrigerante. Este resultado concuerda con la correlación de Gungor-Winterton, según la cual la calidad de salida para la zona bifásica debe aproximarse a 1, tal como se expresa en la ecuación 33.

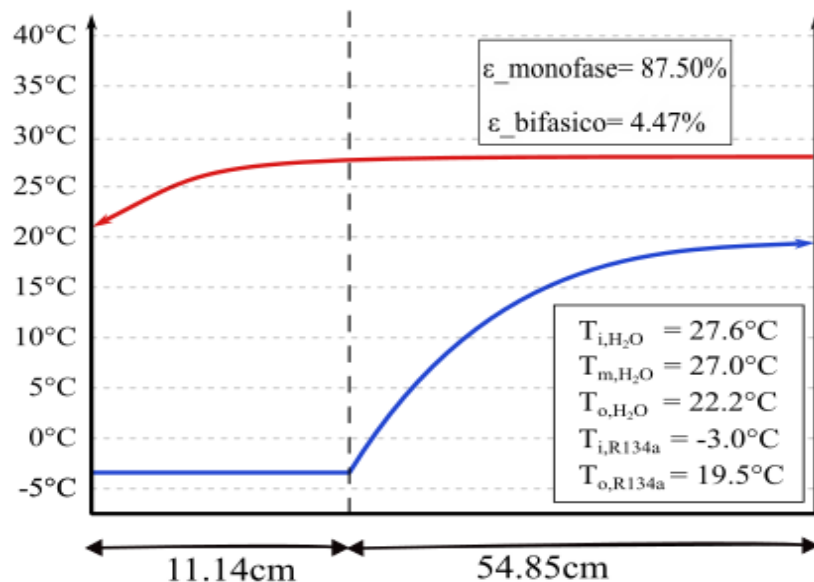
Se omitieron los resultados para 15[°C], debido a que para la condición de caudal de 3,77[l/min] el número de Reynolds del agua se ubicó en la zona de transición ( $2300 < Re < 4000$ ). En este régimen, el flujo no puede clasificarse como laminar o turbulento, lo que imposibilita la aplicación de ecuaciones y correlaciones empíricas confiables para describir con precisión el comportamiento térmico en el intercambiador. Asimismo, para el caudal de 0,6962 [l/min] y la misma temperatura de referencia, se obtuvieron longitudes negativas en la zona bifásica, indicando inconsistencias físicas en el cálculo y, por tanto,

la imposibilidad de representar correctamente el fenómeno de transferencia de calor en esa condición.

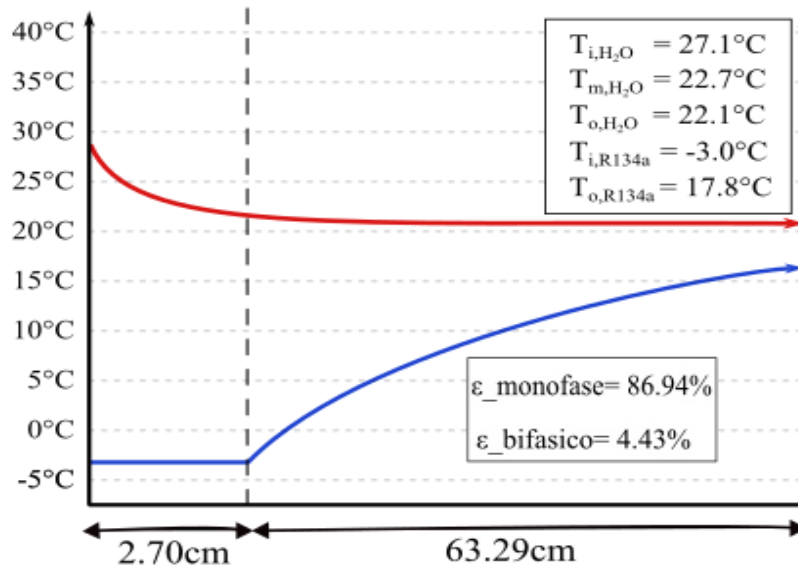
Los resultados reflejados en las Tabla 15 y Tabla 16 se correlacionan con los perfiles de temperatura presentados en las Figura 31 y Figura 32 para las configuraciones de paralelo y contraflujo a una temperatura de referencia de 25[°C] y un caudal de 0.696[l/min]. En ambas figuras, la curva roja representa la evolución de la temperatura del agua que circula por la sección anular, mientras que la curva azul corresponde a la temperatura del refrigerante R134a en el tubo interior. Estas gráficas permiten visualizar la variación espacial de las temperaturas, identificar las longitudes relativas de las zonas bifásica y monofásica, y evaluar el comportamiento térmico del banco de pruebas bajo las dos disposiciones de flujo.

**Figura 31**

*Perfil de temperaturas a 25°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 0.696[l/min]*



(a)



(b)

Nota. (a) Perfil para flujo contracorriente. (b) Perfil para flujo paralelo.

Para la configuración de contraflujo la temperatura del agua disminuye desde (27,6[°C] hasta 22,2[°C]) mientras que el refrigerante aumenta desde una temperatura de saturación de (-3,0[°C] a 19,5[°C]). Lo cual indica una transferencia de calor efectiva, especialmente en la zona monofásica donde se obtiene una efectividad de 87,5% contrastando con un 4,47% en la zona bifásica. La longitud asociada para la zona bifásica es considerablemente mayor que en el arreglo en paralelo, debido a que parte de la transferencia térmica ocurre cuando el refrigerante ya ha alcanzado el cambio de fase.

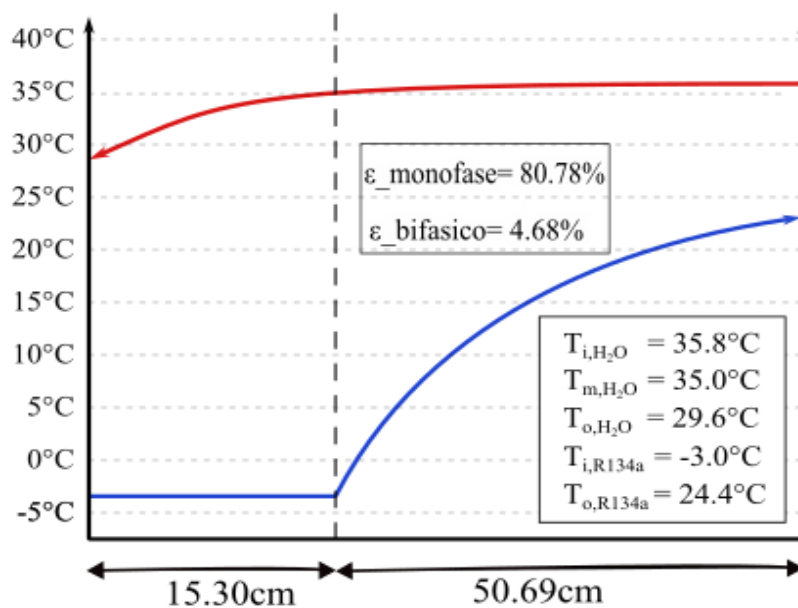
De igual forma, en el flujo paralelo la caída de temperatura del agua es similar (27,1[°C] a 22,1[°C]) y el refrigerante asciende hasta 17,8[°C]. La efectividad monofásica es 86,9 % y la bifásica se mantiene cercana es 4,43 %. El gradiente térmico inicial es mayor en esta disposición, por lo que la longitud bifásica es más corta, la pérdida de diferencia de temperatura a lo largo del tubo limita el intercambio total, de modo que el flujo contracorriente sigue mostrando un aprovechamiento más uniforme del gradiente térmico.

Al elevar la temperatura de referencia del agua como se evidencia en la Figura 32 hasta un valor cercano a los 35[°C], se observa una mejora general en el proceso de transferencia de calor. En el flujo contracorriente, la temperatura del agua desciende de (35,8[°C] a 29,6[°C]), mientras que el refrigerante aumenta de (-3,0[°C] a 24,4[°C]), alcanzando una efectividad monofásica de 80,78 % y bifásica de 4,68 %. En este caso, la eficiencia es menor en la condición de contraflujo, contradiciendo lo que indica la teoría, esto se asocia a posibles problemas en la instrumentación para las pruebas de 35[°C]

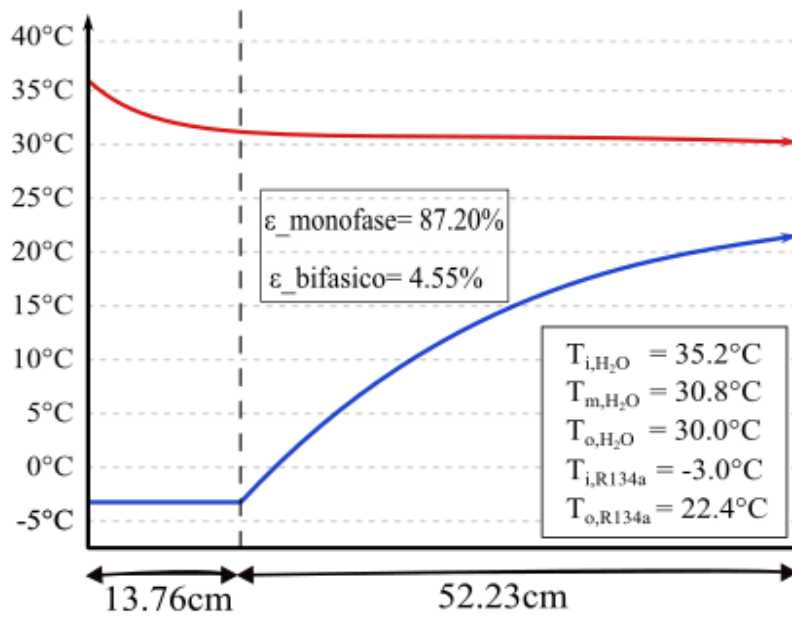
En el flujo paralelo, la temperatura de salida del agua es de 30[°C] y la del refrigerante de 22,4[°C], con una efectividad monofásica de 87,2 % y una bifásica de 4,5%. Como se observa, la eficiencia para la condición de flujo paralelo es superior a la contracorriente por lo que como se mencionó previamente, se asocia a problemas en la instrumentación para esta condición.

### Figura 32

*Perfil de temperaturas a 35°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 0.696[l/min]*



(a)



(b)

Nota. (a) Perfil para flujo contracorriente. (b) Perfil para flujo paralelo.

En la Tabla 17 se presentan los valores experimentales de presión y temperatura registrados para ambas configuraciones de flujo, paralelo y contraflujo, bajo una temperatura de entrada de 25 °C y un caudal de 0,696 [l/min].

**Tabla 17**

*Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 25 [°C] y caudal de 0,696 [l/min].*

Punto	PARALELO		CONTRAFLUJO	
	Presión[kPa]	Temperatura[°C]	Presión[kPa]	Temperatura[°C]
1	263.1	17.88	263.1	19.58
2	814.6	45.53	814.6	46.33
3	814.6	30.19	814.6	31.7
4	263.1	-----	263.1	-----

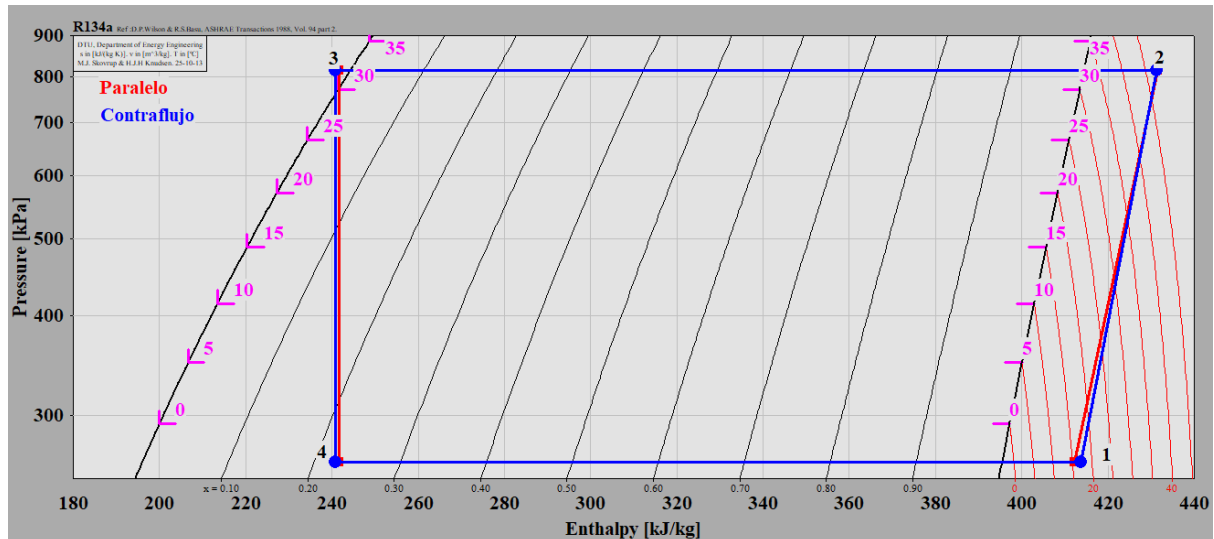
*Nota.* Los puntos 1-2-3-4 componen el ciclo de compresión presente en el diagrama de Mollier en la Figura 33. Adaptado de: Autores.

Estos datos permitieron analizar el comportamiento térmico del refrigerante R134a dentro del intercambiador de calor y sirvieron como base para la construcción de los diagramas de Mollier correspondientes. En la Figura 33 se muestra la representación gráfica de ambos procesos sobre el diagrama de Mollier (P-h), donde se puede observar el ciclo termodinámico del refrigerante en cada configuración. Las trayectorias 1-2-3 describen la etapa de compresión y condensación, mientras que los tramos 3-4 y 4-1 representan la expansión isoentálpica y la evaporación isobárica, respectivamente. Al superponer ambos diagramas, se evidencia que las variaciones de entalpía y presión son similares para las dos configuraciones, aunque el contraflujo presenta una leve diferencia en los valores de temperatura, lo cual confirma lo expuesto anteriormente de una transferencia de calor más estable y un mejor aprovechamiento del gradiente térmico a lo largo del intercambiador.

Finalmente, los resultados evidencian que la eficiencia del intercambiador depende fuertemente de la interacción entre la temperatura, el caudal y el tipo de flujo. El aumento del caudal y de la temperatura de referencia mejora la capacidad de transferencia térmica, mientras que la configuración contracorriente proporciona una operación más estable y efectiva. Estos comportamientos concuerdan con la teoría de la transferencia de calor en flujos internos y validan el desempeño del banco de pruebas desarrollado.

**Figura 33**

*Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 25[°C] y caudal de 0,696 [l/min].*



Asimismo, en el Apéndice E se complementa este análisis de resultados, proporcionando la información experimental y gráfica que sustenta las conclusiones obtenidas.

## 5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto de grado permitió la construcción un banco de pruebas orientado al estudio de los procesos de transferencia de calor asociados a un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Para ello, en primera instancia se comprobó y reemplazaron los elementos en mal estado, para luego proceder al funcionamiento de cada componente, garantizando la operación adecuada. Esto permitió al sistema modificar tanto los caudales como las configuraciones de flujo (paralelo y contraflujo), utilizando como fluidos de trabajo agua a temperatura controlada y refrigerante R134a proveniente de un ciclo por compresión. Además, integra un sistema

de adquisición de datos basado en Arduino, empleado para registrar las variables principales del proceso, como la temperatura y el caudal.

De manera complementaria, se implementó un modelo matemático en Python que dispone de una interfaz, para el análisis de los parámetros característicos garantizando un funcionamiento práctico. En estos se encontraron transferencia de calor efectiva, donde se aprecia que para ambas disposiciones de caudales (3.755 [l/min] y 0.696 [l/min]) en la zona monofásica tienen una efectividad por encima del 80%, por otro lado, en zona bifásica cuando el caudal es de 3.775 [l/min] la efectividad es máximo de 1% en régimen contraflujo, por el contrario, cuando el caudal es de 0.696 [l/min] la efectividad en zona bifásica llega a ser cerca del 4%, esto se debe a que al restringir la velocidad en el fluido hay transferencia de calor por conducción pura prácticamente en el intercambiador de calor, sin embargo, cuando el caudal es de 3.775 [l/min] el movimiento del fluido es mayor y por ello mayor es la transferencia por convección viendo un salto de 81.53% (en zona monofásica con caudal de 0.696 [l/min]) a 85.36% esto comparando en régimen contraflujo a 25°C.

Además, se instauró una práctica de laboratorio por medio de una guía de laboratorio para facilitar la aplicación práctica de los conceptos de transferencia de calor en intercambiadores de tubos concéntricos. Esta incluye una introducción a la práctica, los objetivos de esta, una breve descripción de los componentes del equipo, el procedimiento experimental y los resultados y discusiones. Durante el desarrollo de la guía, el estudiante evalúa la eficiencia térmica del sistema en las configuraciones de flujo paralelo y contracorriente, aplicando los métodos  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD para analizar el desempeño del equipo. Asimismo, construye el diagrama de Mollier del refrigerante R134a, correspondiente al ciclo de compresión del banco de pruebas, con el fin de

relacionar los resultados experimentales con los fundamentos teóricos del proceso. (Ver Apéndice F).

A su vez, se realizó un manual de operación del banco de prueba donde se encuentran la descripción de los componentes que conforman los 4 subsistemas, el diagrama eléctrico, así como la conexión del sistema de adquisición de datos, la puesta en marcha, así como un mantenimiento preventivo para el banco (Ver Apéndice G).

## **6. Recomendaciones**

La efectividad del sistema no depende únicamente del flujo másico del R134a y del agua, sino también del tiempo de contacto dentro del intercambiador de calor. En este sentido, se recomienda incrementar el área de transferencia de calor aumentando su longitud.

Asimismo, se sugiere reducir la longitud del tubo capilar, con el propósito de disminuir el sobrecalentamiento excesivo y la pérdida de carga en el refrigerante, en consecuencia, minimizar el gradiente de temperatura del refrigerante a lo largo del intercambiador.

El sistema de adquisición de datos es susceptible a mejoras, para solucionar la lectura de los sensores en el equipo.

### Referencias Bibliográficas

- ALFA LAVAL. (s.f.). *ALFA LAVAL*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2025, de Intercambiador de calor - Definición, funcionamiento, tipos, aplicaciones y mucho más: <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones>
- Ansal. (s.f.). Recuperado el 5 de Marzo de 2024, de <https://w3.ansal.com.ar/ansal/static/content/PDF/01eef82a-7180-11b8-aa94-61a72eb68ef4.pdf>
- Arvizu, H. (2001). *Modelado de transferencia de Calor Conjugada en condiciones de flujo Bifasico*. MEXICO: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Bengtson, H. (2010). *Convection Heat Transfer Coeficcient Estimation*.
- Caceres, D. (15 de Septiembre de 2024). Recuperado el 25 de Septiembre de 2025, de La importancia de la práctica para el aprendizaje: <https://tupsicologoenlinea.org/neuropsicologia/la-importancia-de-la-practica-para-el-aprendizaje>
- Cengel, Y. (2020). *Transferencia de Calor y Masa* (3ra edicion ed.). Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. G. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGrawHill.
- Cofrico. (1 de Septiembre de 2025). *Cofrico*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2025, de Intercambiadores de calor. Cómo funcionan: [https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/intercambiadores-de-calor/?\\_gl=1\\*12oqg2\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_ga\\*OTA3Mjk2MDk4LjE3NTk0MjIxMTY.\\*\\_ga\\_CSFN199SN0\\*czE3NTk0MjIxMTYkbzEkZzEkdDE3NTk0MjI2MDAkajYwJGwwJGgw](https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/intercambiadores-de-calor/?_gl=1*12oqg2*_up*MQ..*_ga*OTA3Mjk2MDk4LjE3NTk0MjIxMTY.*_ga_CSFN199SN0*czE3NTk0MjIxMTYkbzEkZzEkdDE3NTk0MjI2MDAkajYwJGwwJGgw)

Danfoss. (8 de Julio de 2025). Obtenido de Refriasesoria JC:

<https://www.youtube.com/watch?v=fi8ji0XeZhs>

Fundación ENDESA. (s.f.). *Endesa*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2025, de La

energía: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia>

La Red Electrónica S.A.S. (s.f.). *La Red Electrónica*. Recuperado el 25 de Septiembre de

2025, de FICHA TECNICA UT320D: <https://laredelectronica.com/producto/termometro-digital-ut320d>

Minco Products, Inc. (s.f.). *Minco*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2025, de Type K

Thermocouple Overview: [https://www-minco-com.translate.goog/type-k-thermocouple-overview/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-minco-com.translate.goog/type-k-thermocouple-overview/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

mytectutor. (Julio de 2018). *mytectutor*. Recuperado el 23 de Agosto de 2025, de Using

PLX-DAQ with Arduino.: [https://mytectutor-com.translate.goog/using-plx-daq-with-arduino-getting-started/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc&as\\_qdr=y15](https://mytectutor-com.translate.goog/using-plx-daq-with-arduino-getting-started/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc&as_qdr=y15)

Naylamp Mechatronics SAC. (2023). *Naylamp Mechatronics*. Recuperado el 8 de Junio

de 2025, de Naylamp Mechatronics: <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html>

SACOME. (26 de Septiembre de 2019). *SACOME*. Recuperado el 25 de Septiembre de

2025, de Intercambiadores de calor de doble tubo: <https://www.sacome.com/intercambiadores-calor-doble-tubo>

Tecumseh. (Abril de 2019). Recuperado el 9 de Noviembre de 2023, de

[https://d363y1u90kc5w6.cloudfront.net/userfiles/masterflux/documents/catalogue%20&%20flyers/masterflux%20product%20catalog%20\(spanish\).pdf](https://d363y1u90kc5w6.cloudfront.net/userfiles/masterflux/documents/catalogue%20&%20flyers/masterflux%20product%20catalog%20(spanish).pdf)

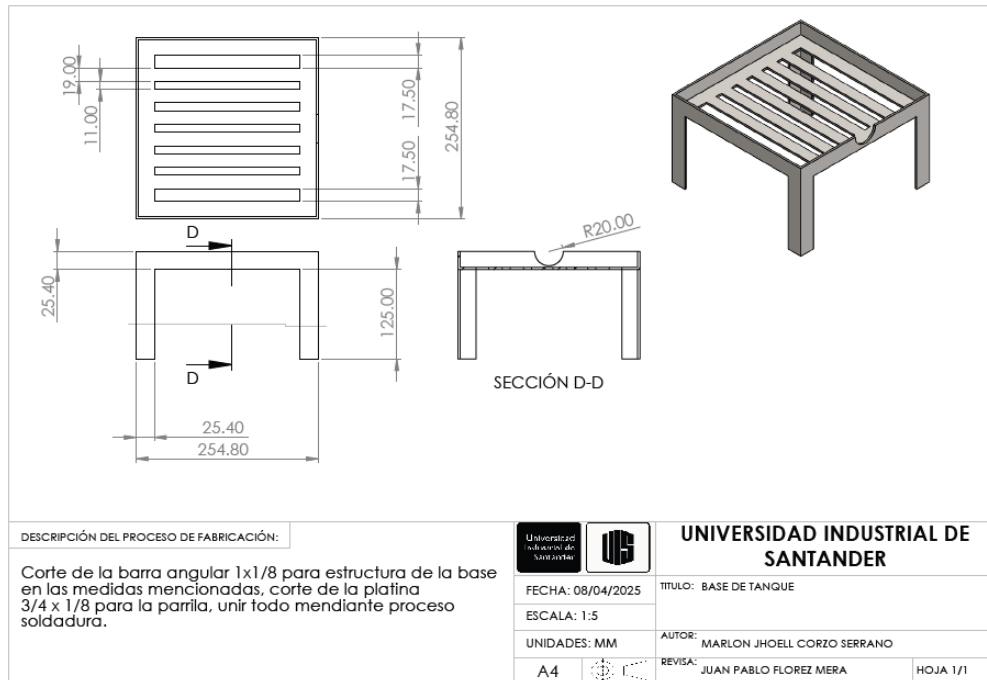
Yuetter, C. (s.f.). *Scribd*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2025, de Scribd:

[https://es.scribd.com/document/289310199/Por-Que-Debemos-Hacer-Multiples-](https://es.scribd.com/document/289310199/Por-Que-Debemos-Hacer-Multiples-Pruebas-de-Un-Experimento)

[Pruebas-de-Un-Experimento](https://es.scribd.com/document/289310199/Por-Que-Debemos-Hacer-Multiples-Pruebas-de-Un-Experimento)

## Apéndices

### Apéndice A. Base Tanque



### Apéndice B. Resultados de la experimentación

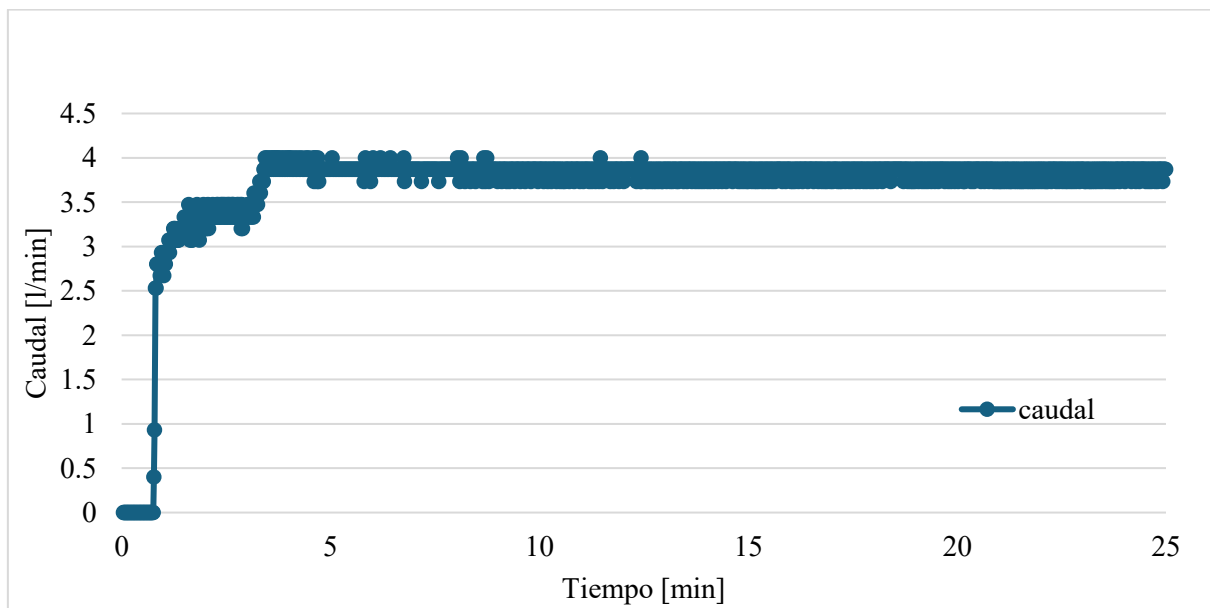
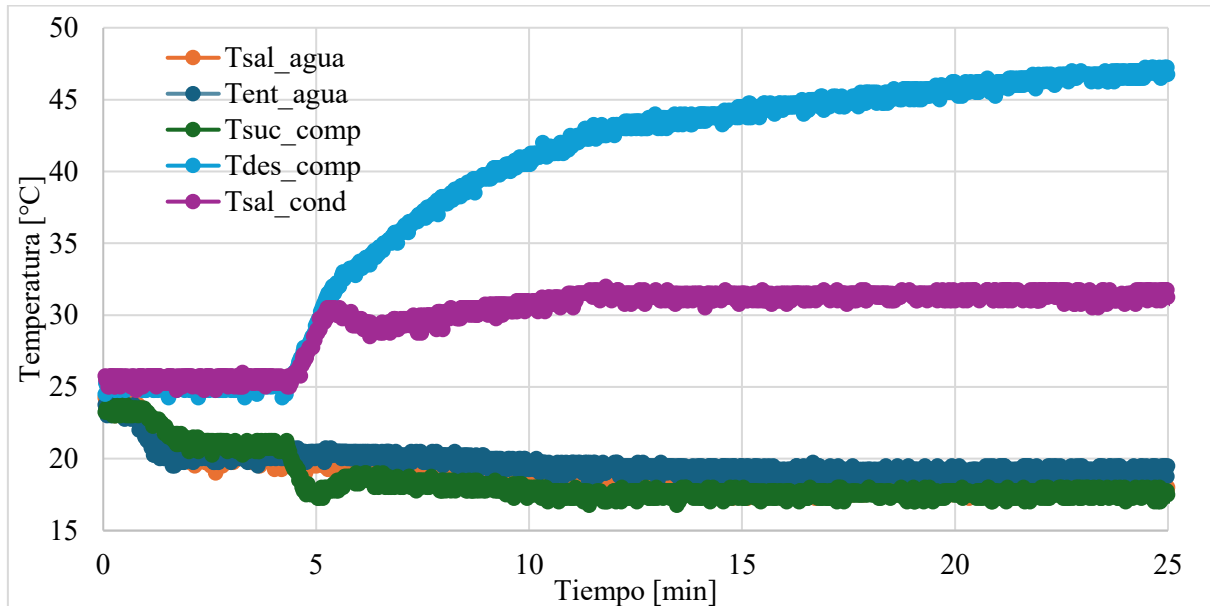
A continuación, se presentan los diagramas de temperatura contra el tiempo, así como los resultados de las temperaturas en las pruebas de las combinaciones experimentales en adición a los presentados en la sección 4.1.1.

Desde la Figura 34 hasta la Figura 56 se presentan los resultados de todas las combinaciones experimentales. Como se había descrito se observó que en todos los experimentos a caudal de 0.696[l/min], se presentan una disminución significativa en ambas configuraciones siendo un poco más eficiente en régimen contraflujo, por otro lado, a caudal de 3.775 [l/min] no se ve un gran cambio de la temperatura del agua a la entrada y salida para ambos casos, sin embargo, se observan leves mejoras en las configuraciones con flujo contracorriente.

**Figura 34**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 18**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	17.99	19.09	17.56	45.79	31.38	3.84
<b>Valor. min</b>	17.25	18.25	17.00	43.75	30.50	3.73
<b>Valor. máx</b>	18.50	19.75	18.00	47.25	31.75	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.27	0.23	0.89	0.25	0.06

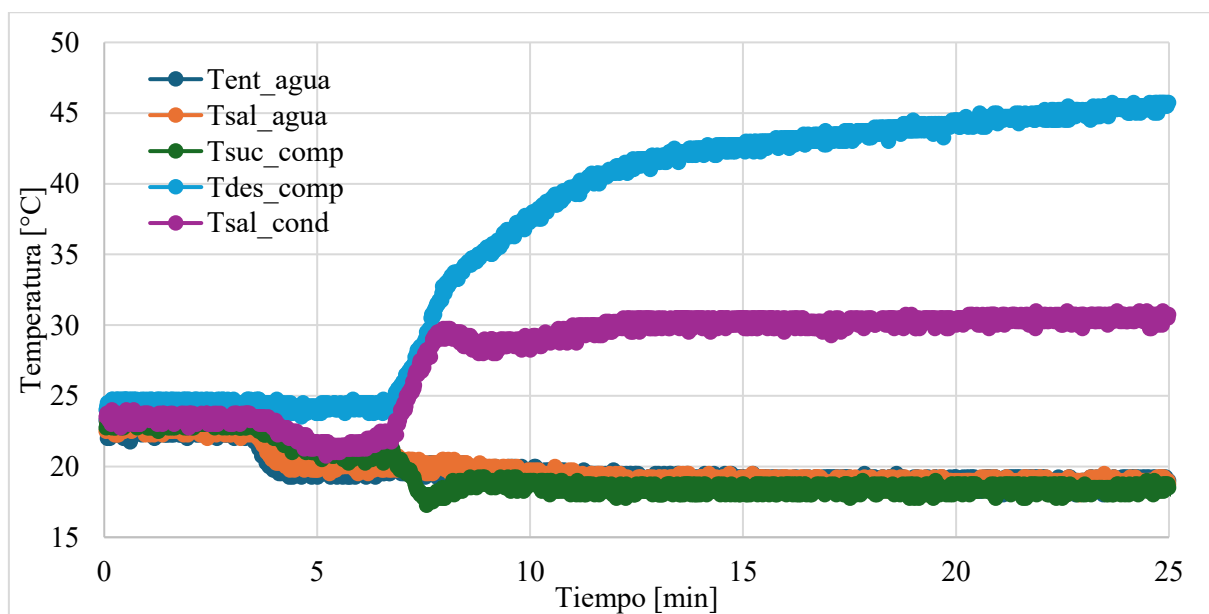
Rango 15 a 25 minutos

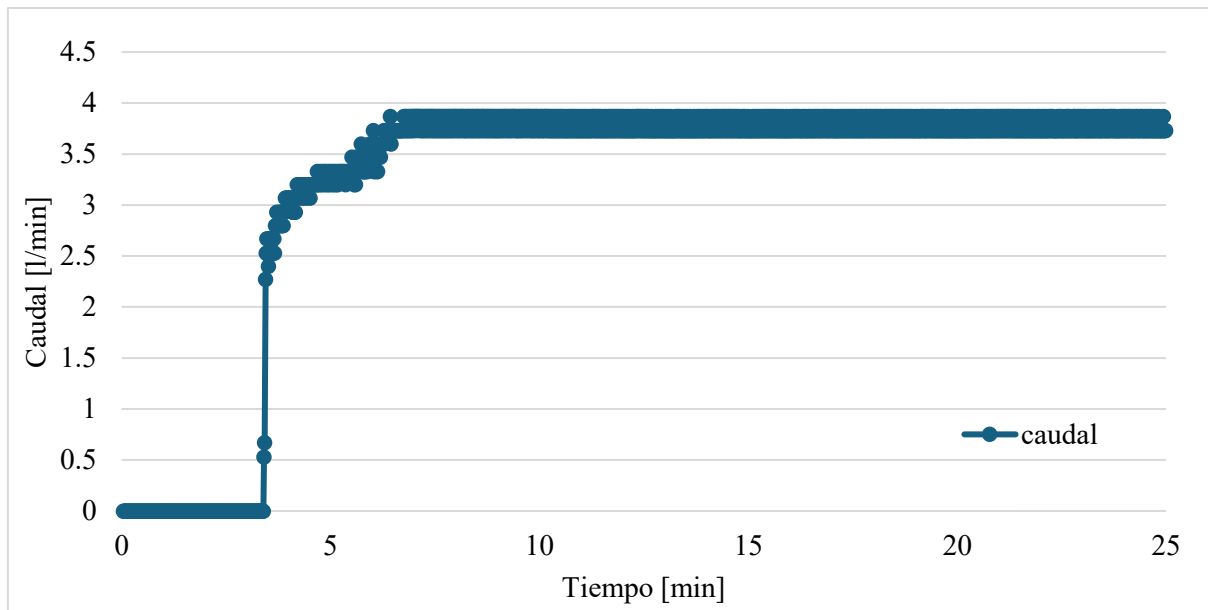
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 35**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 19**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contraflujo, Toma 1*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	18.93	18.84	18.43	44.27	30.35	3.77
<b>Valor. min</b>	18.00	18.00	17.75	42.25	29.25	3.73
<b>Valor. máx</b>	19.50	19.50	19.00	46.00	31.00	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.26	0.26	0.24	0.89	0.29	0.06

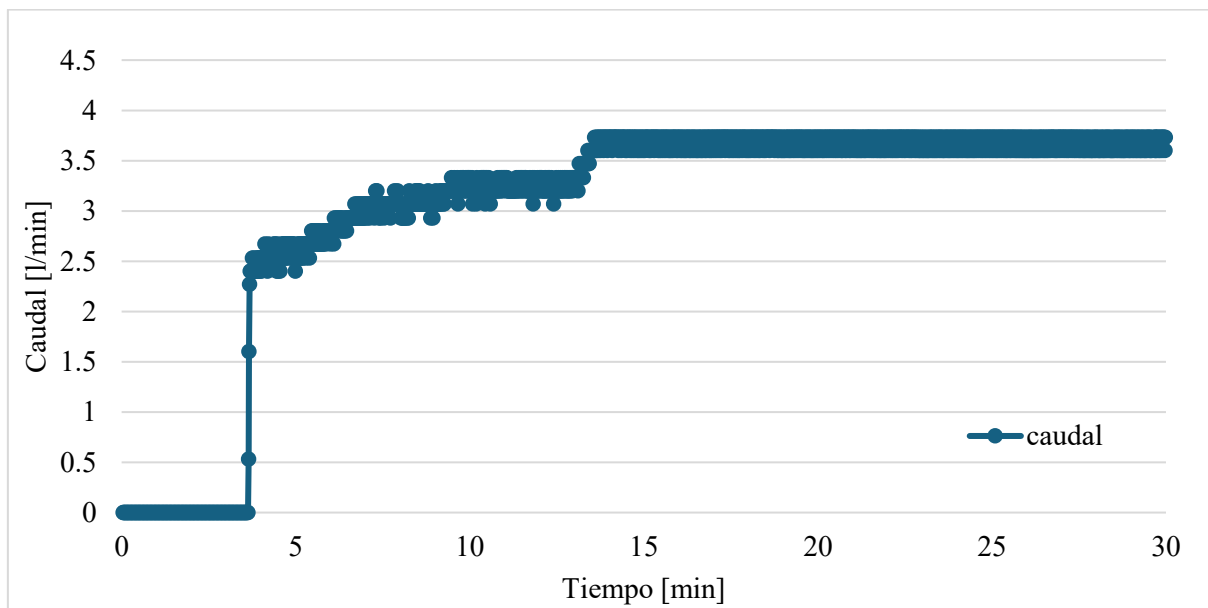
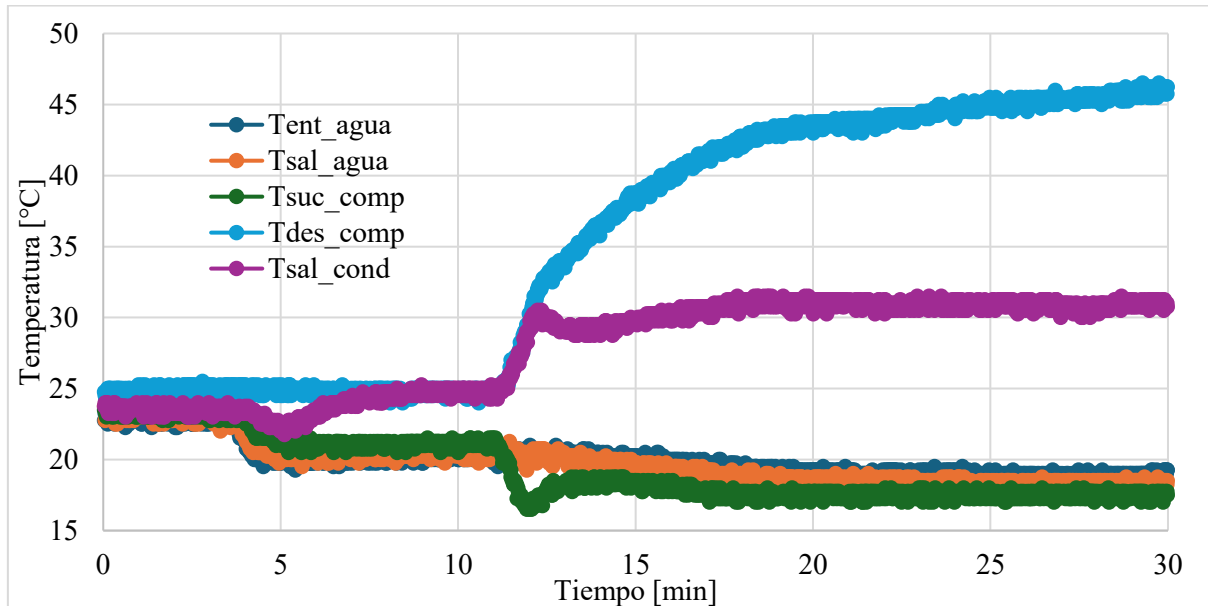
Rango 15 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 36**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 20**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contraflujo, Toma 2*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	18.88	18.31	17.53	44.71	30.94	3.68
<b>Valor. min</b>	18.00	17.25	17.00	42.75	30.00	3.60
<b>Valor. máx</b>	19.50	19.00	18.00	46.50	31.50	3.73
<b>Desviación estándar</b>	0.28	0.28	0.22	0.86	0.26	0.06

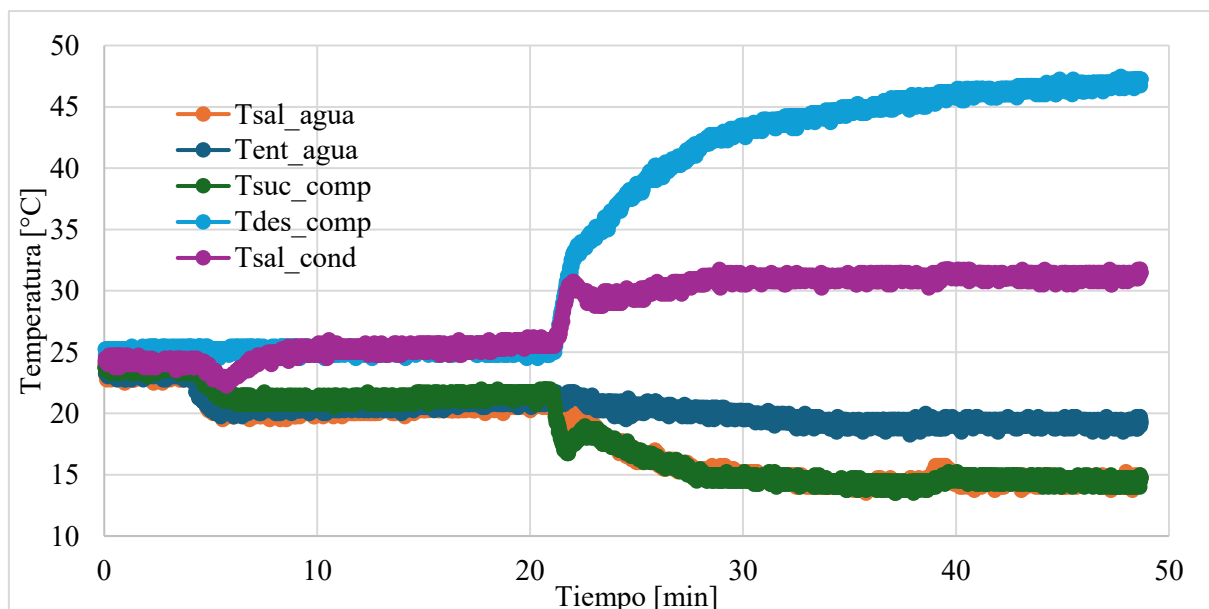
Rango 19 a 30 minutos

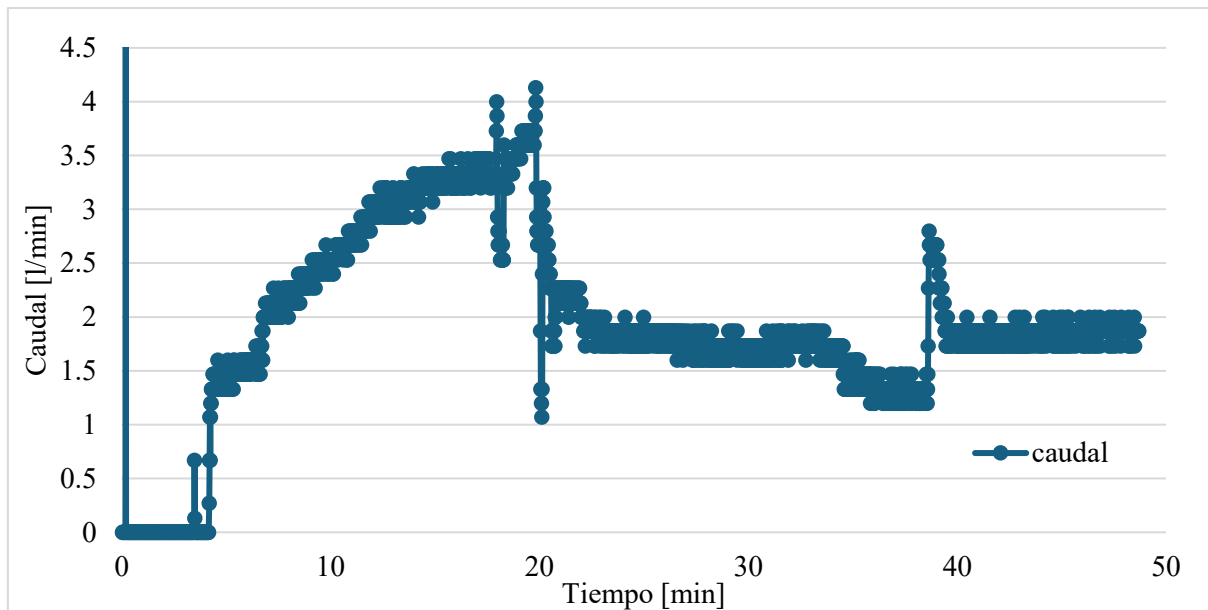
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 37**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 21**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	14.51	19.23	14.60	46.56	31.24	1.85
<b>Valor. min</b>	13.75	18.50	14.00	45.50	30.50	1.73
<b>Valor. máx</b>	15.25	19.75	15.25	47.50	31.75	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.24	0.25	0.38	0.25	0.06

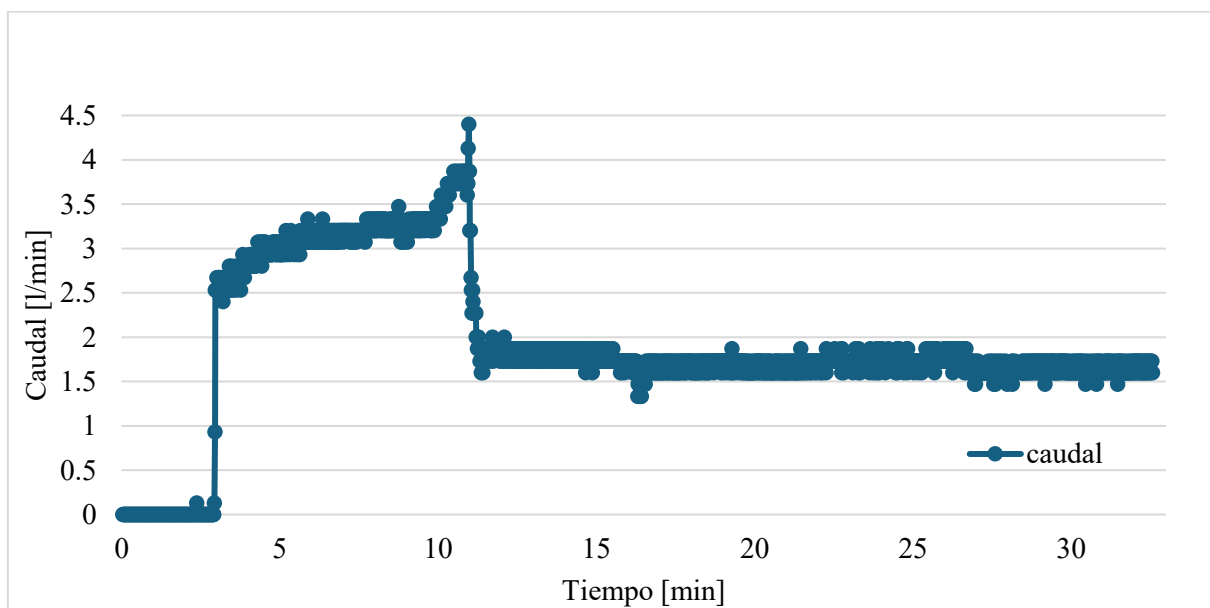
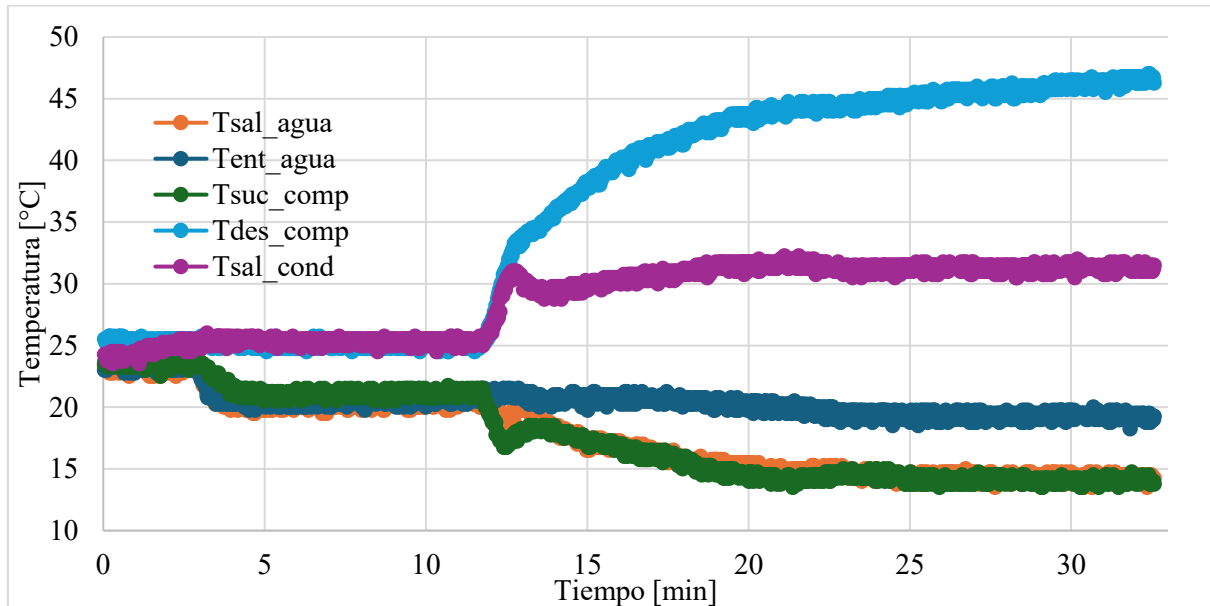
Rango 40 a 48 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 38**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 2*



**Tabla 22**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2*

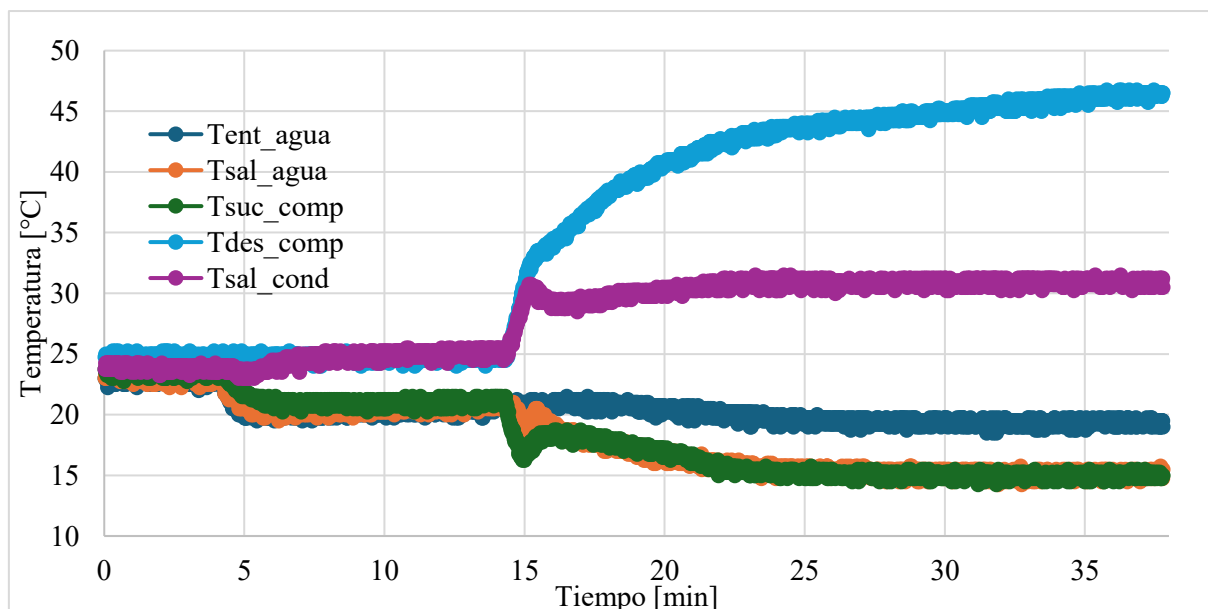
	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	14.31	19.33	14.08	45.88	31.30	1.66
<b>Valor. min</b>	13.50	18.25	13.50	44.75	30.50	1.47
<b>Valor. máx</b>	15.00	20.00	14.75	47.00	32.00	1.87
<b>Desviación estándar</b>	0.27	0.26	0.23	0.51	0.25	0.08

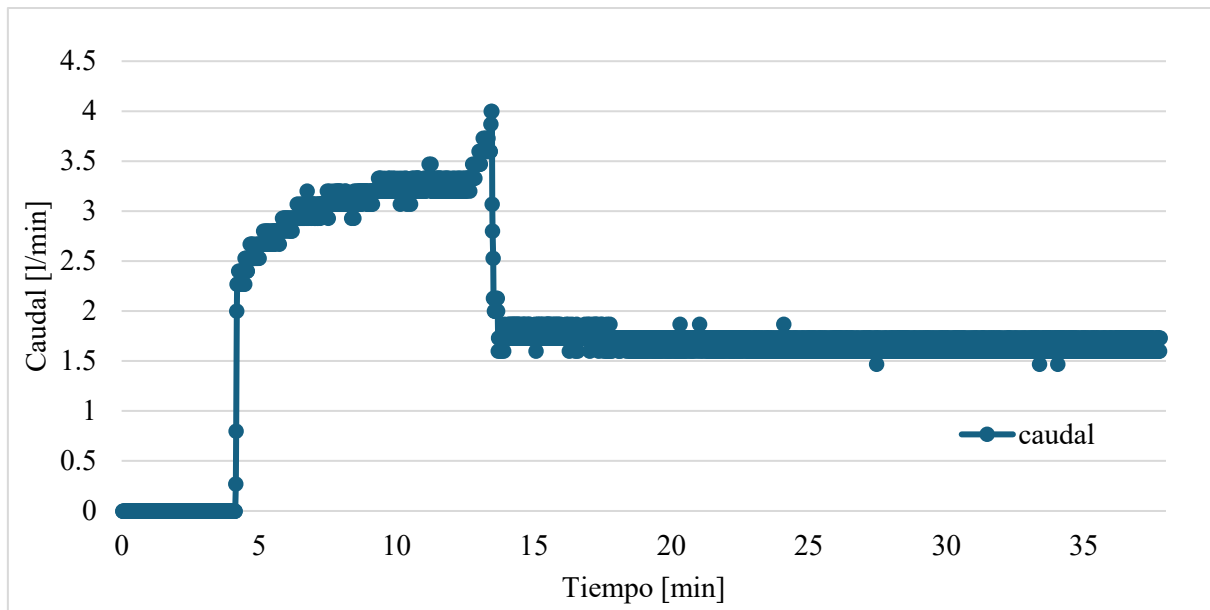
Rango 25 a 32 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 39**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 23**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	19.41	15.17	15.02	45.32	30.93	1.66
<b>Valor. min</b>	18.50	14.25	14.25	43.25	30.00	1.47
<b>Valor. máx</b>	20.00	15.75	15.50	46.75	31.50	1.73
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.28	0.22	0.82	0.25	0.07

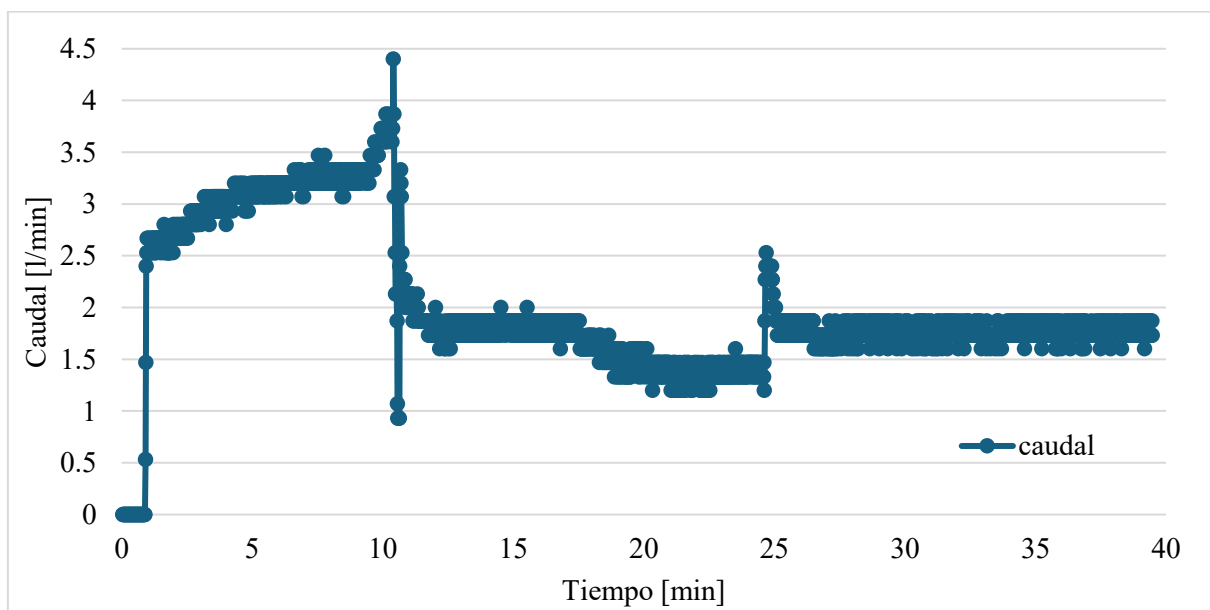
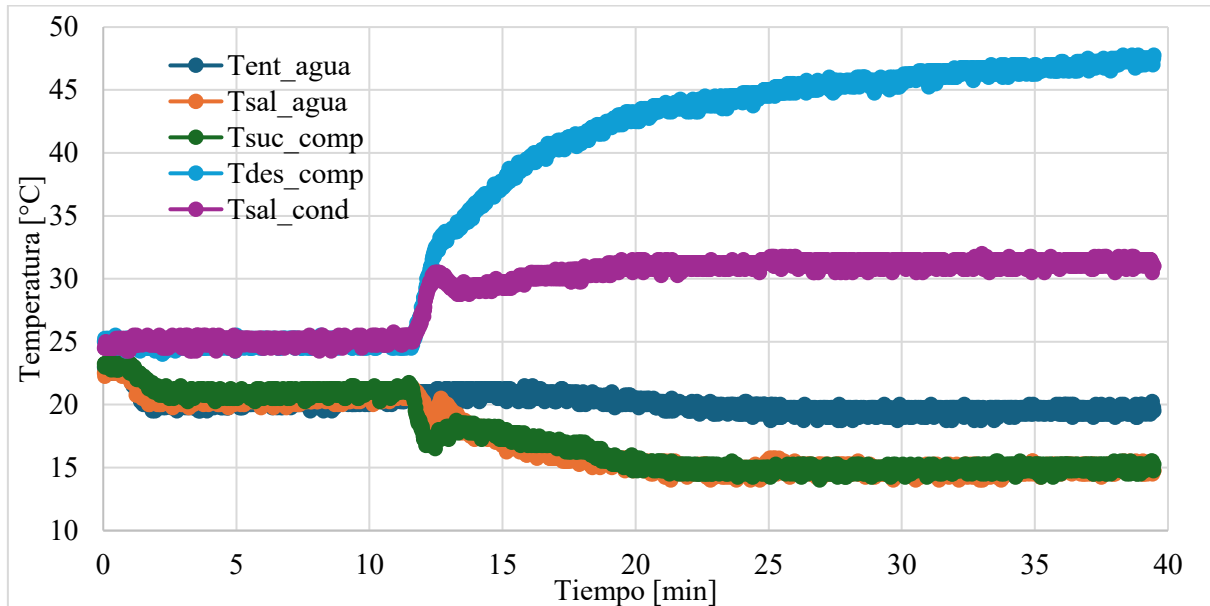
Rango 25 a 37 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 40**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 15°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 24**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 15°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 2*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	19.56	14.88	14.98	46.77	31.26	1.75
<b>Valor. min</b>	18.75	14.00	14.25	45.25	30.50	1.60
<b>Valor. máx</b>	20.25	15.50	15.50	47.75	32.00	1.87
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.26	0.22	0.44	0.24	0.07

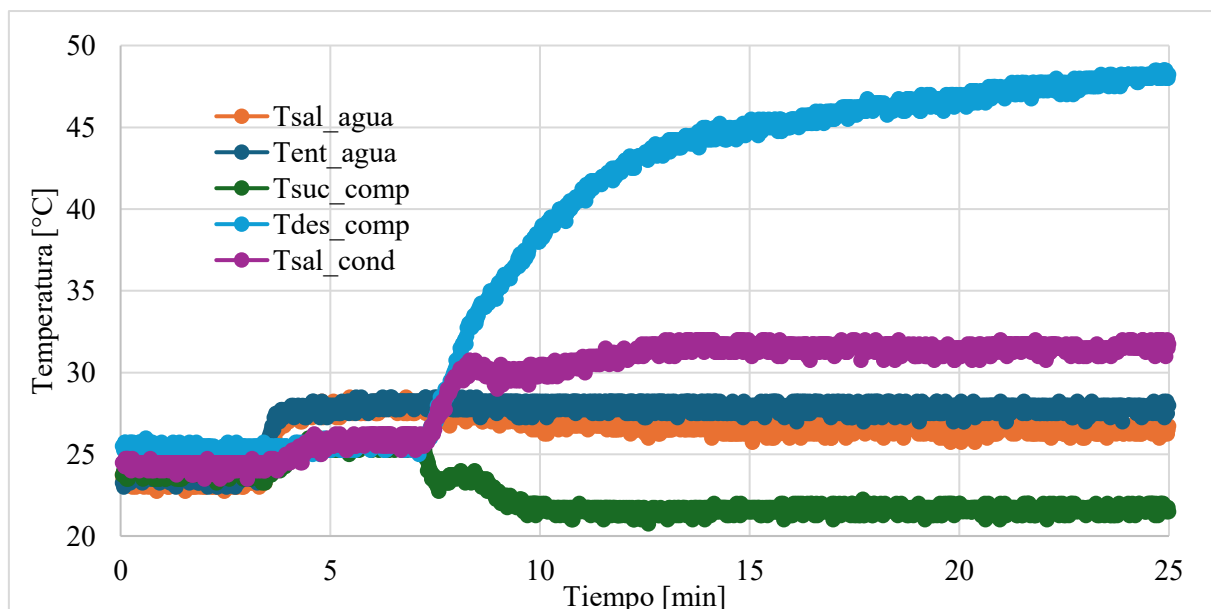
Rango 30 a 39 minutos

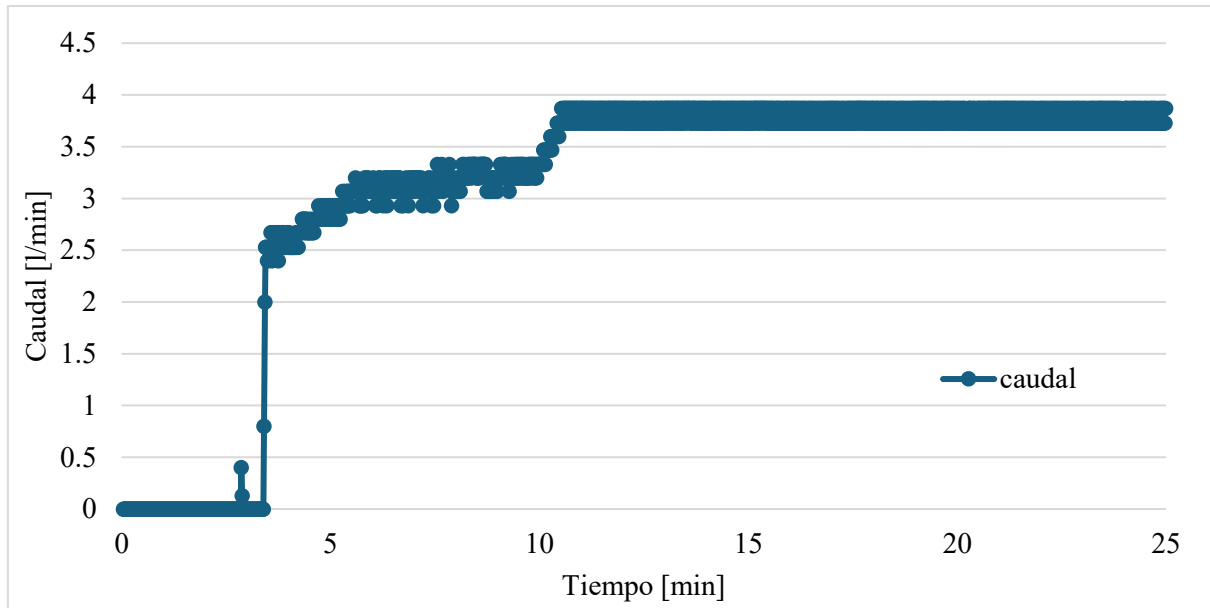
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 41**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 25**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	26.57	27.83	21.67	47.17	31.50	3.80
<b>Valor. min</b>	25.75	27.00	21.00	45.50	30.75	3.73
<b>Valor. máx</b>	27.00	28.25	22.25	48.50	32.00	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.23	0.26	0.22	0.76	0.26	0.07

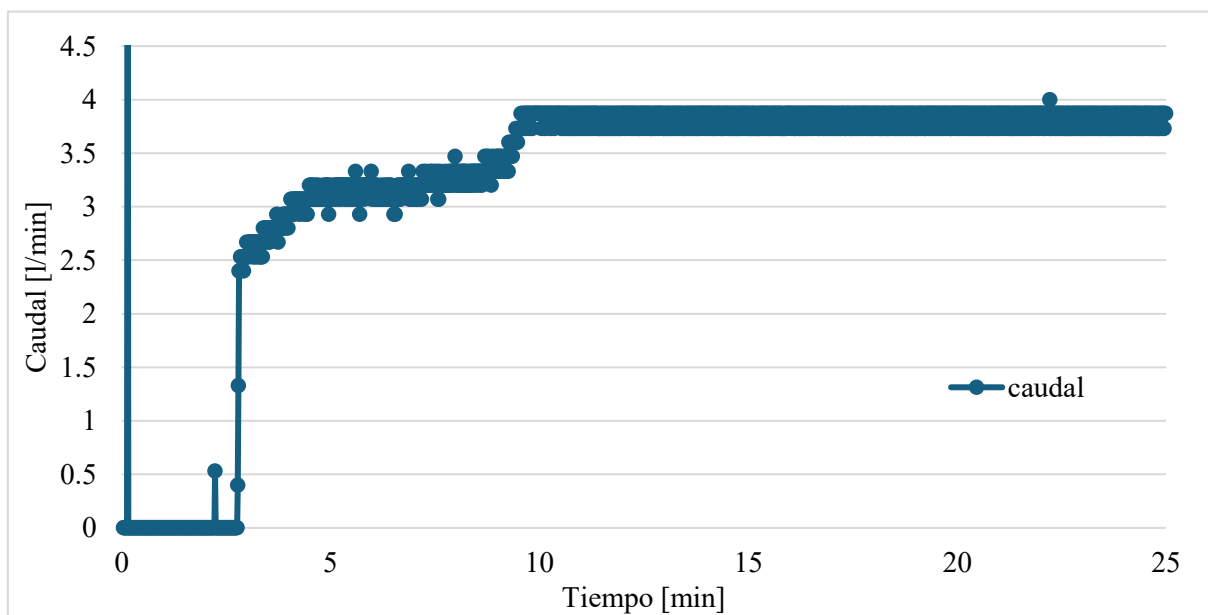
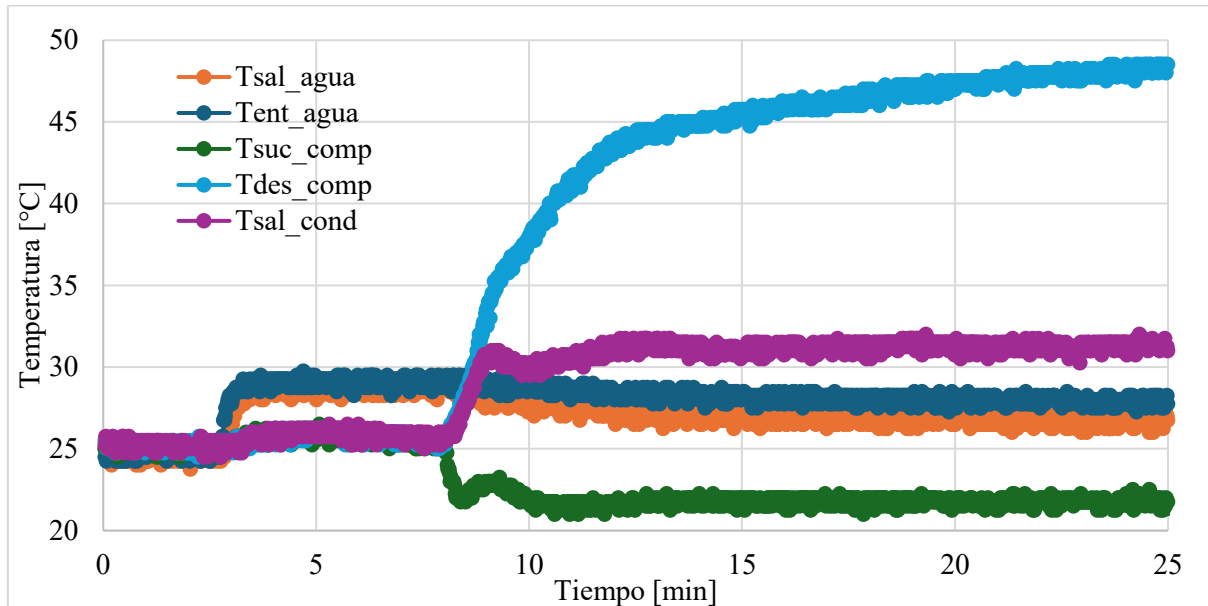
Rango 17 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 42**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 2*



**Tabla 26**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 2*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	26.79	28.01	21.76	47.19	31.28	3.83
<b>Valor. min</b>	26.00	27.25	21.00	45.25	30.25	3.73
<b>Valor. máx</b>	27.50	28.50	22.50	48.75	32.00	4.00
<b>Desviación estándar</b>	0.27	0.24	0.21	0.85	0.26	0.06

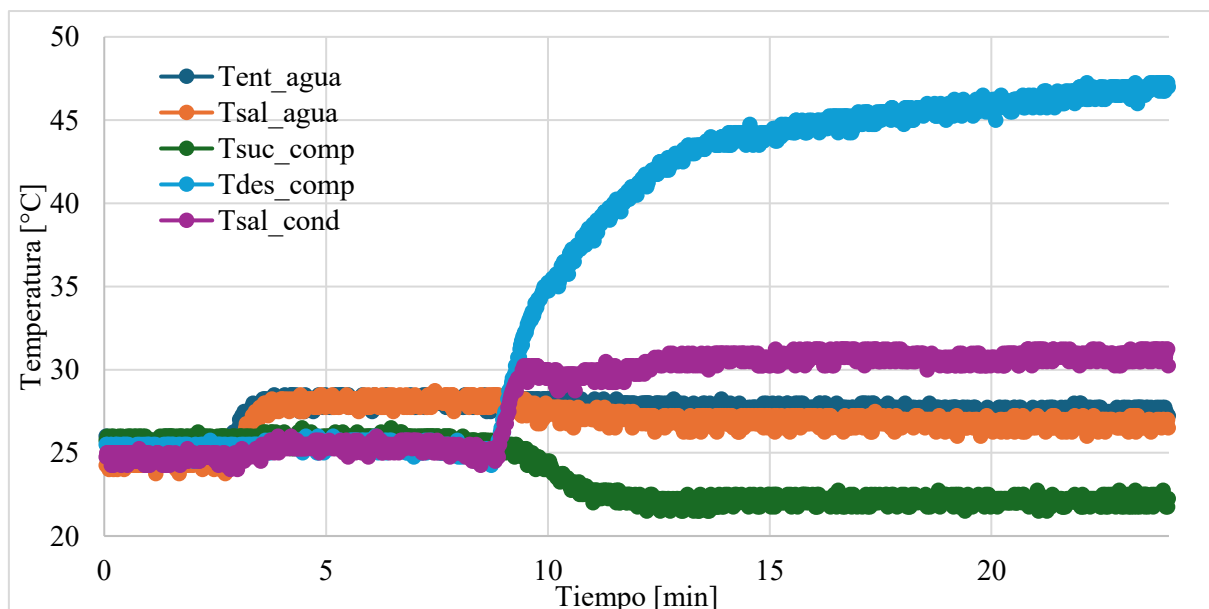
Rango 15 a 25 minutos

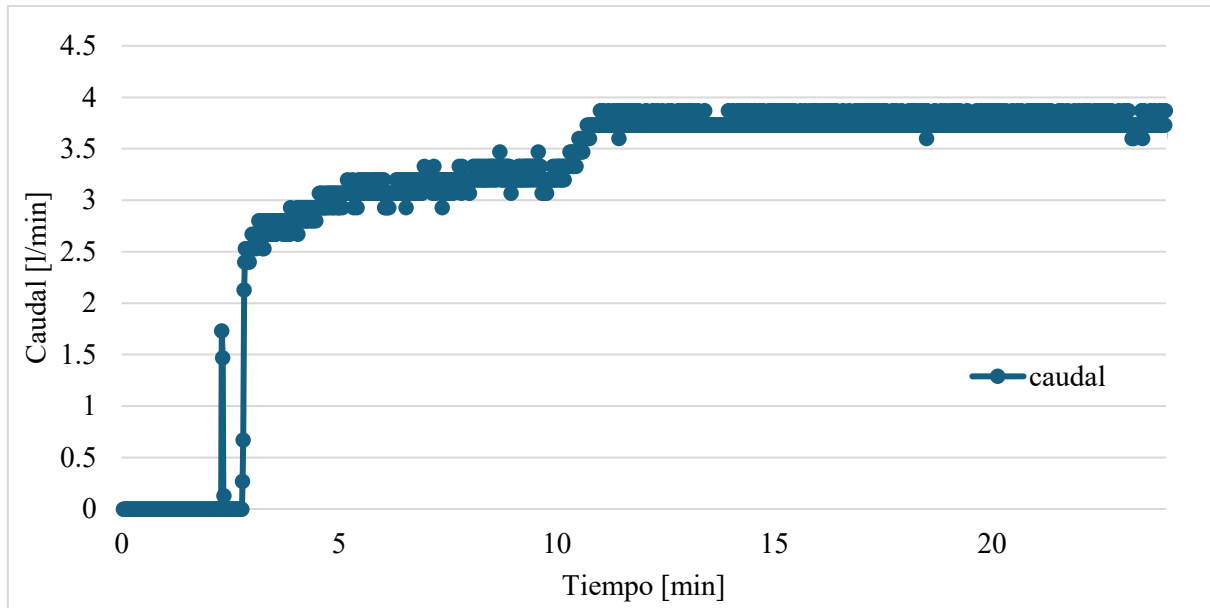
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 43**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 27**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	27.49	26.80	22.17	45.80	30.80	3.75
<b>Valor. min</b>	26.75	26.00	21.50	43.75	30.00	3.60
<b>Valor. máx</b>	28.00	27.50	22.75	47.50	31.25	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.26	0.26	0.23	0.83	0.29	0.06

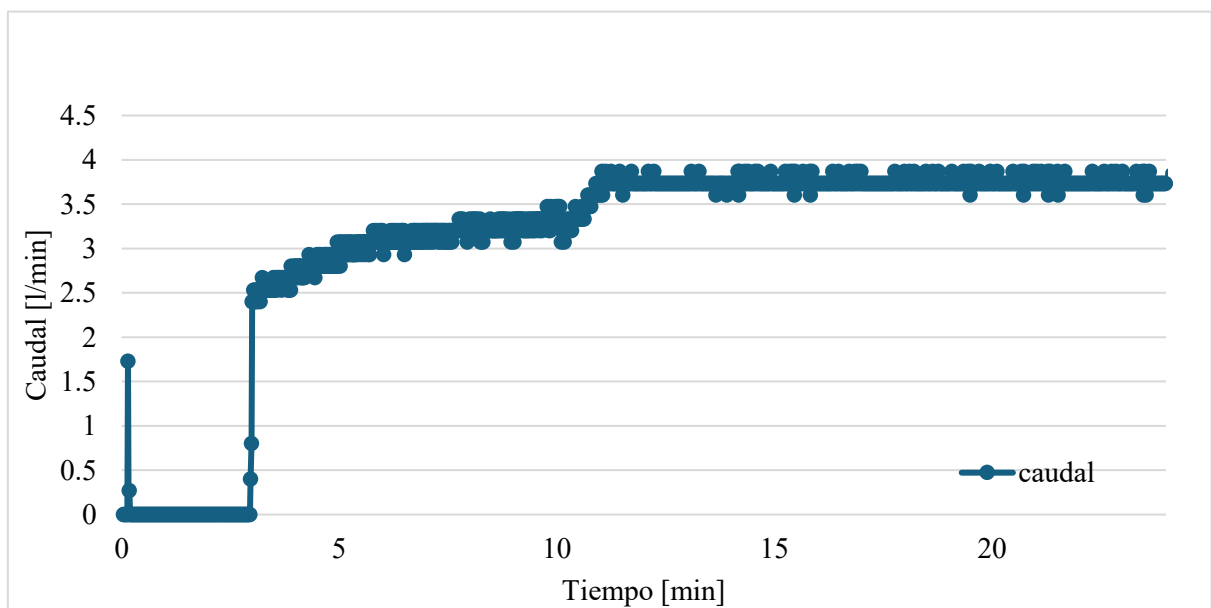
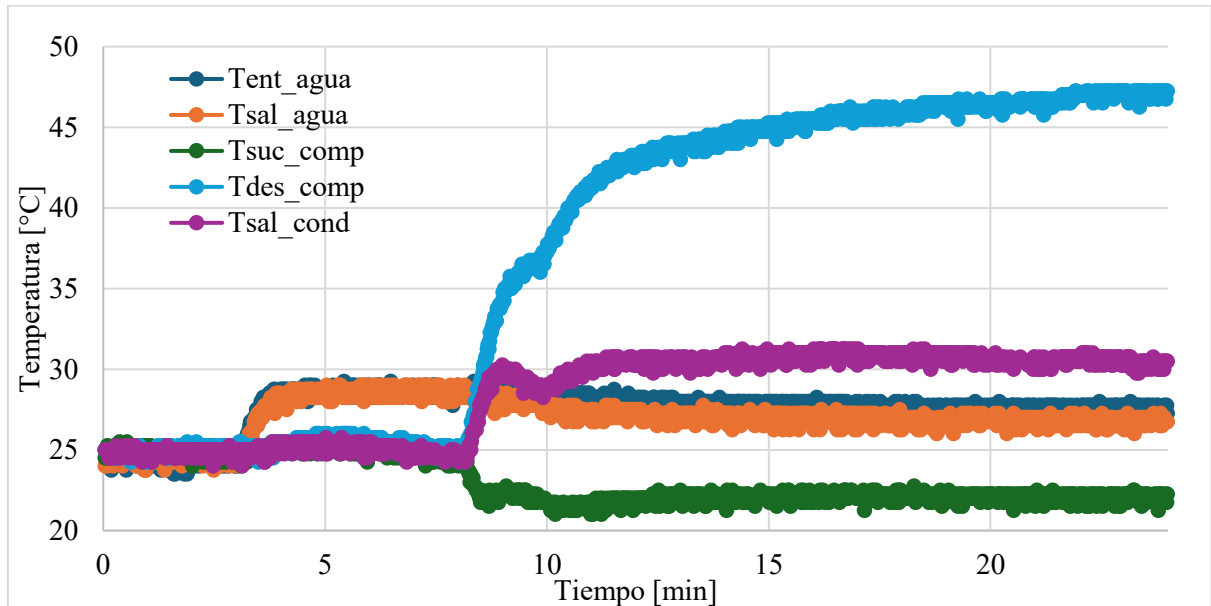
Rango 15 a 24 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 44**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 28**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 2*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	27.59	26.85	22.08	46.32	30.69	3.74
<b>Valor. min</b>	26.75	26.00	21.25	44.25	29.75	3.60
<b>Valor. máx</b>	28.25	27.50	22.75	47.50	31.25	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.27	0.28	0.24	0.64	0.31	0.04

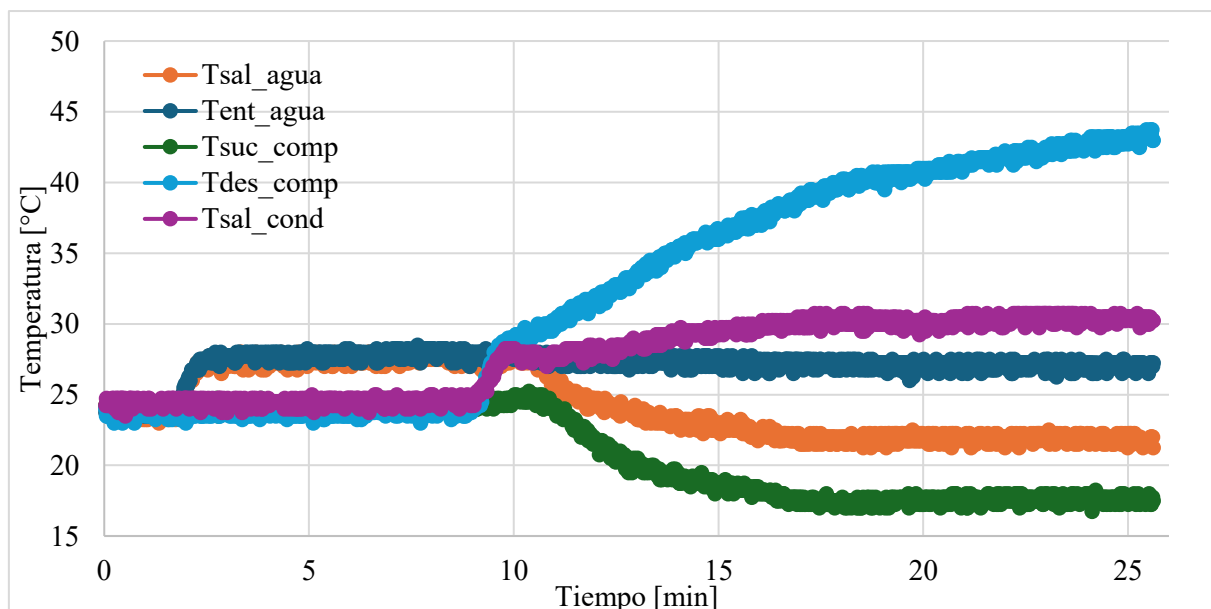
Rango 15 a 24 minutos

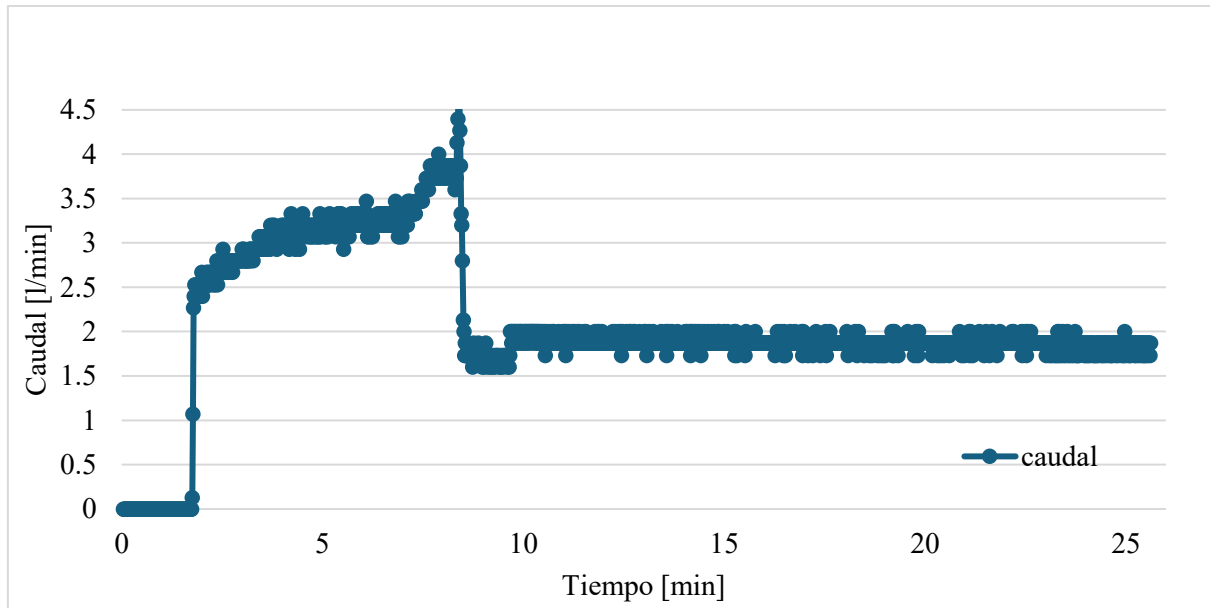
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 45**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 29**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	21.92	27.06	17.62	42.18	30.35	1.85
<b>Valor. min</b>	21.25	26.25	16.75	40.25	29.50	1.73
<b>Valor. máx</b>	22.50	27.50	18.25	43.75	30.75	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.26	0.24	0.79	0.28	0.06

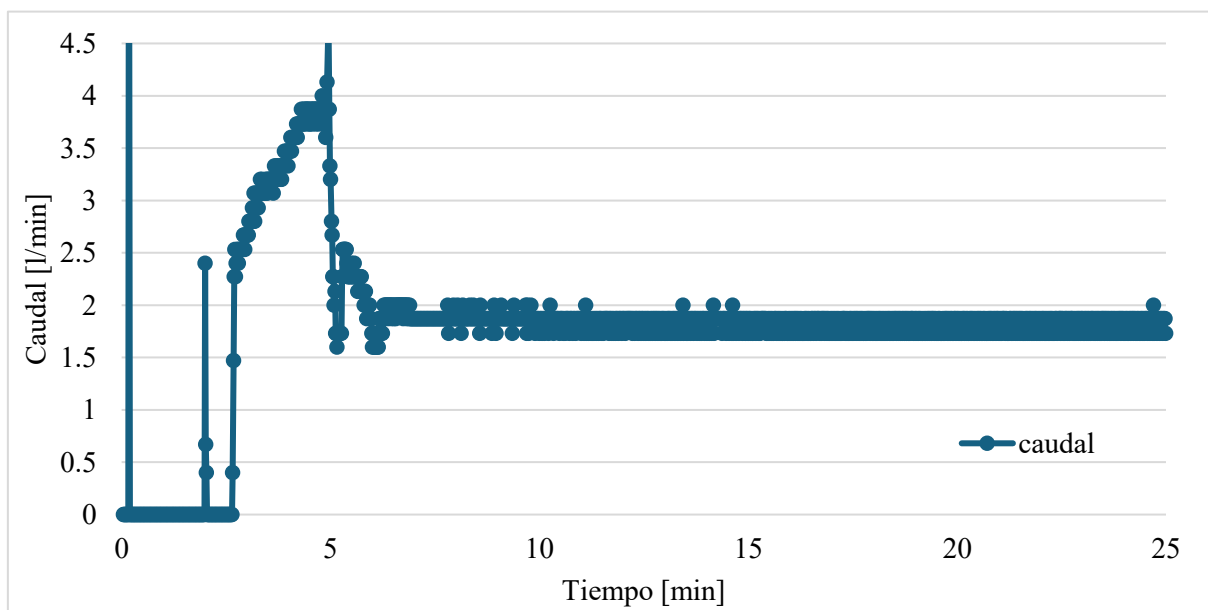
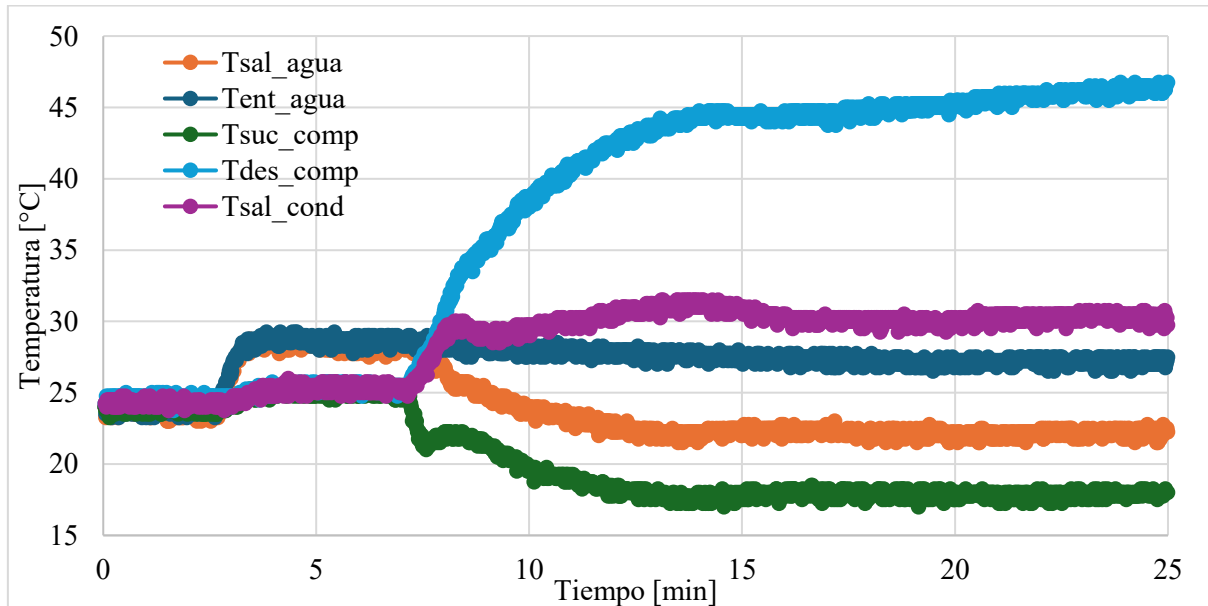
Rango 20 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 46**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 2*



**Tabla 30**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo paralelo, Toma 2*

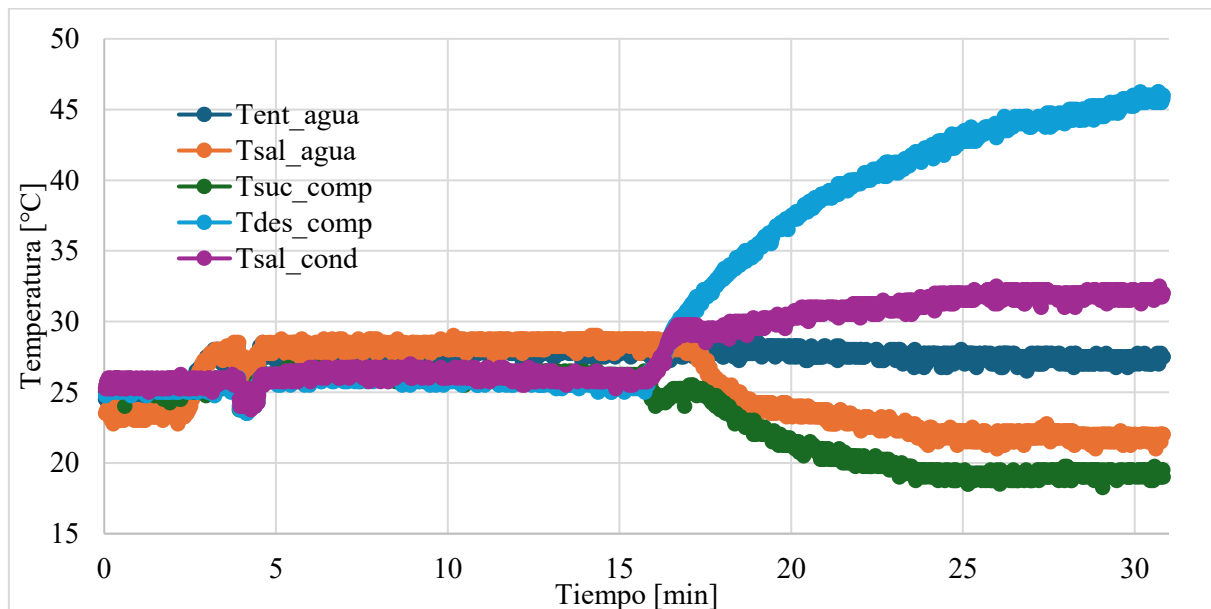
	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	22.16	27.18	17.88	45.53	30.19	1.82
<b>Valor. min</b>	21.50	26.50	17.00	43.75	29.25	1.73
<b>Valor. máx</b>	23.00	27.75	18.25	46.75	30.75	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.25	0.23	0.63	0.30	0.07

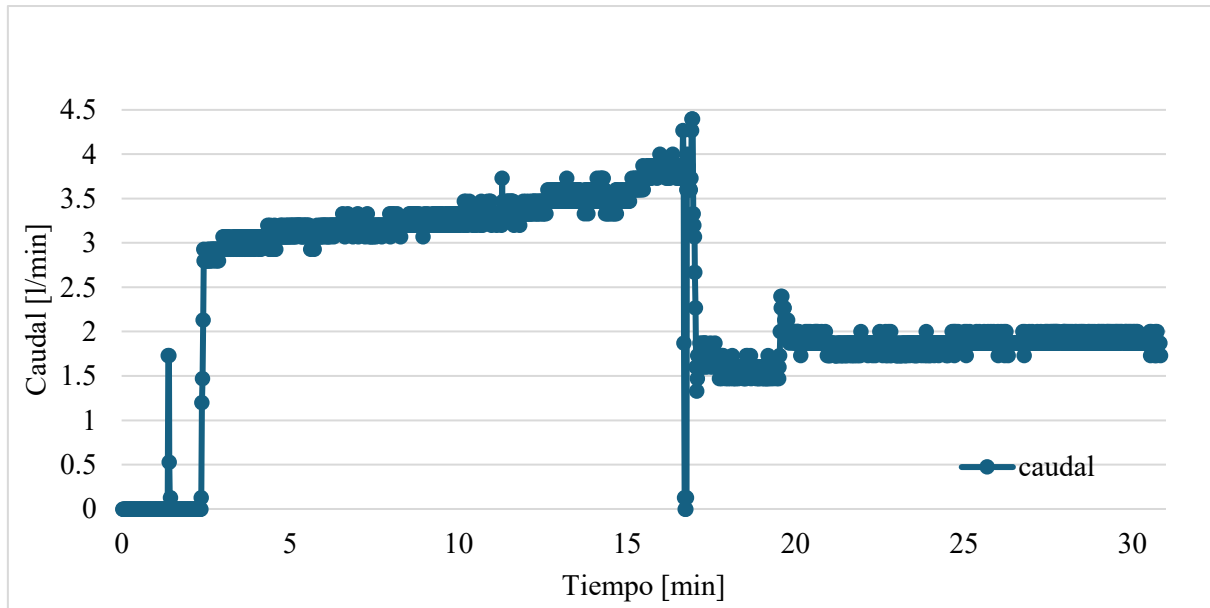
Rango 17 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 47**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 31**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	27.38	21.87	19.21	44.80	31.92	1.90
<b>Valor. min</b>	26.50	21.00	18.25	43.50	31.00	1.73
<b>Valor. máx</b>	27.75	22.75	19.75	46.25	32.50	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.26	0.23	0.70	0.25	0.06

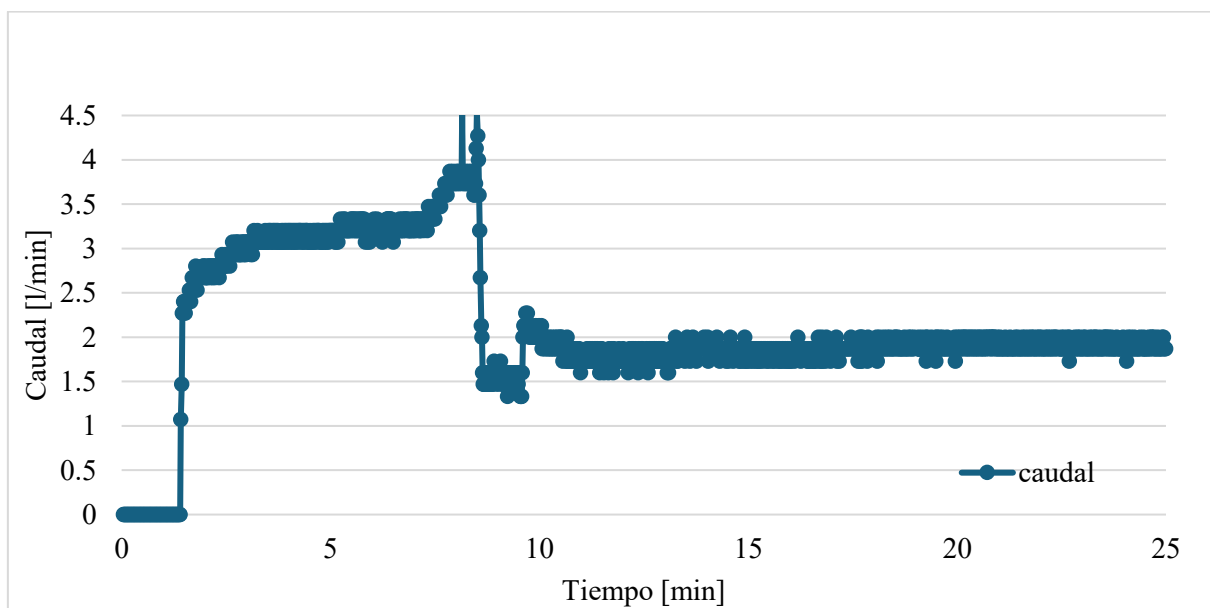
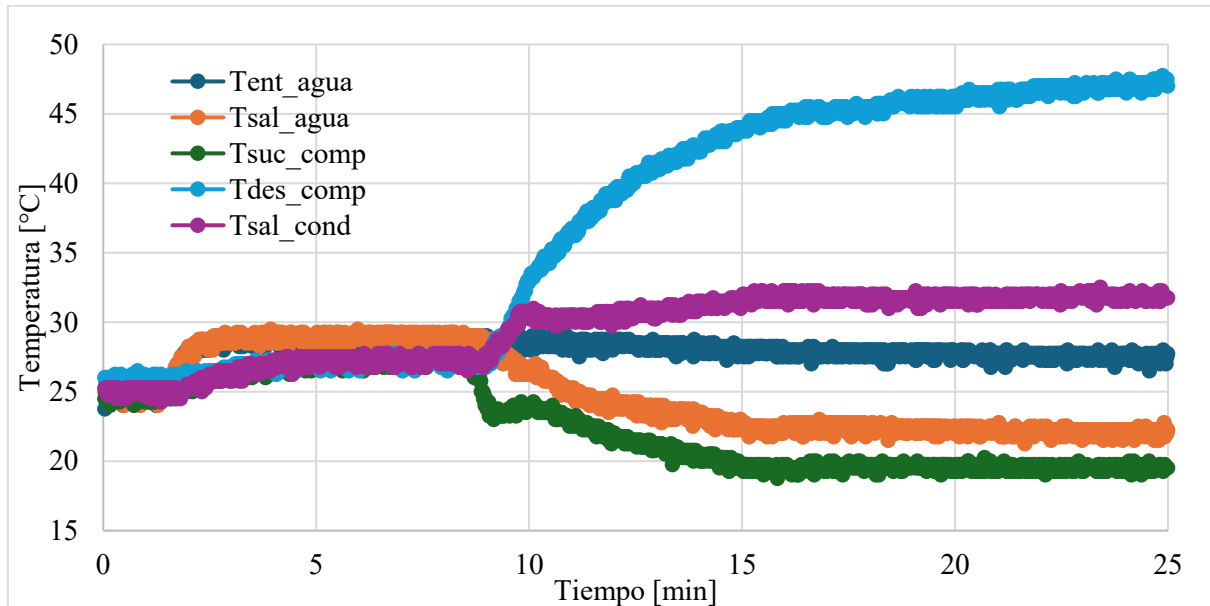
Rango 26 a 30 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 48**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 25°C, caudal 0.696 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 32**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 25°C, caudal 0.696 [l/min] y flujo contracorriente, Toma 2*

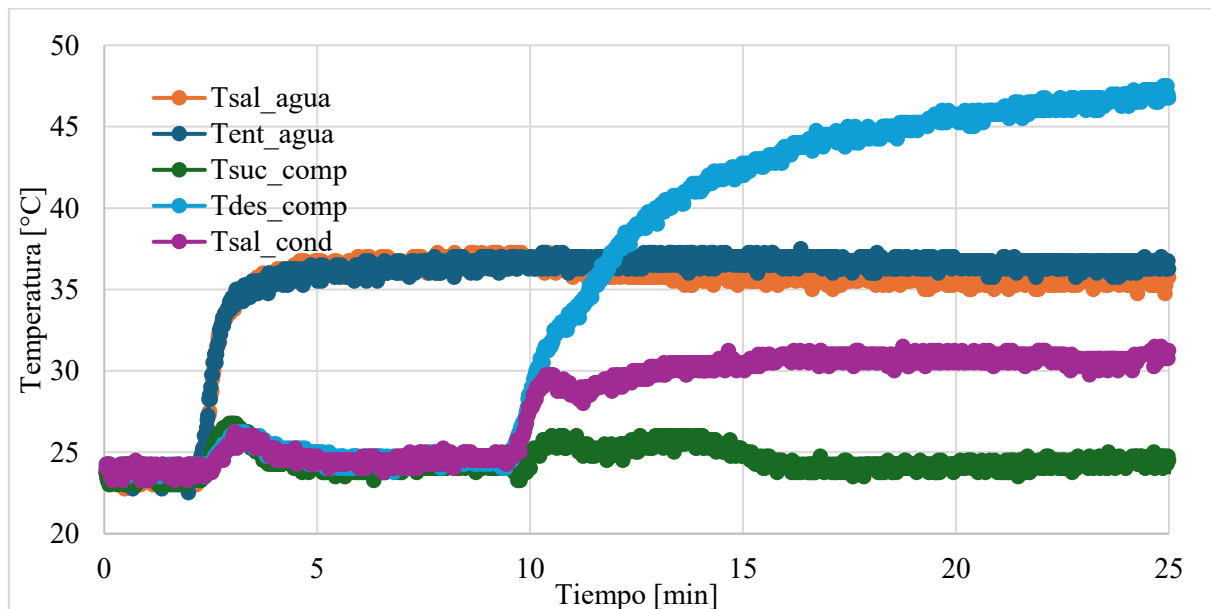
	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	27.67	22.21	19.58	46.33	31.78	1.89
<b>Valor. min</b>	26.50	21.25	19.00	44.75	31.00	1.73
<b>Valor. máx</b>	28.25	22.75	20.25	47.75	32.50	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.27	0.21	0.68	0.22	0.06

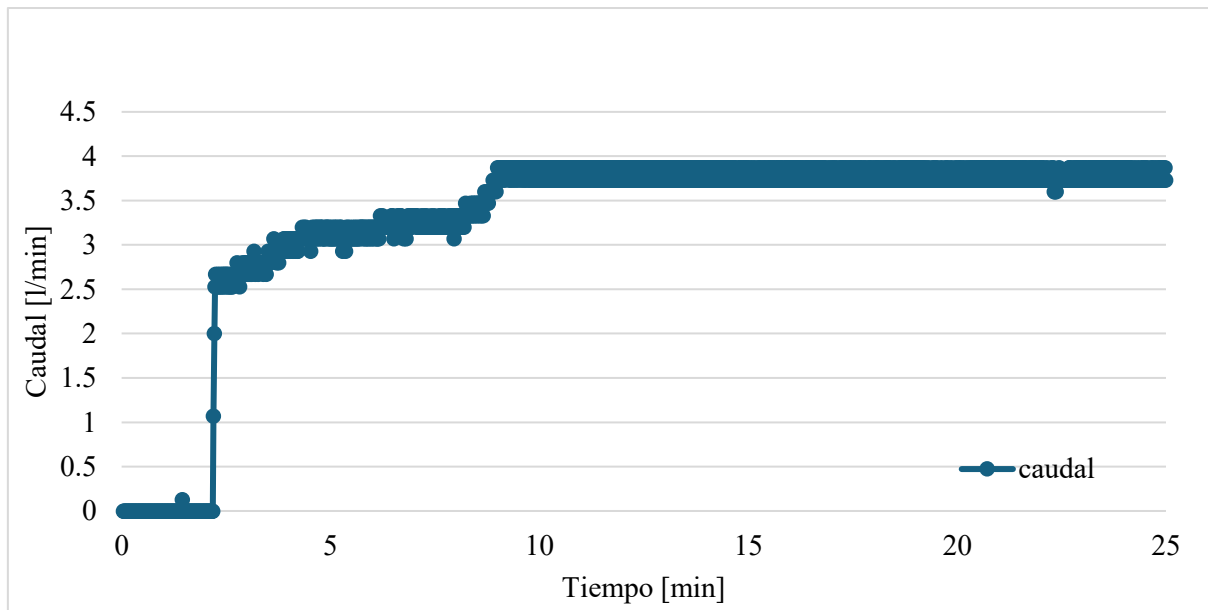
Rango 17 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 49**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min] y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 33**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	35.62	36.57	24.25	45.88	30.81	3.77
<b>Valor. min</b>	34.75	35.75	23.50	43.75	29.75	3.60
<b>Valor. máx</b>	36.25	37.25	25.00	47.75	31.50	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.26	0.27	0.90	0.29	0.07

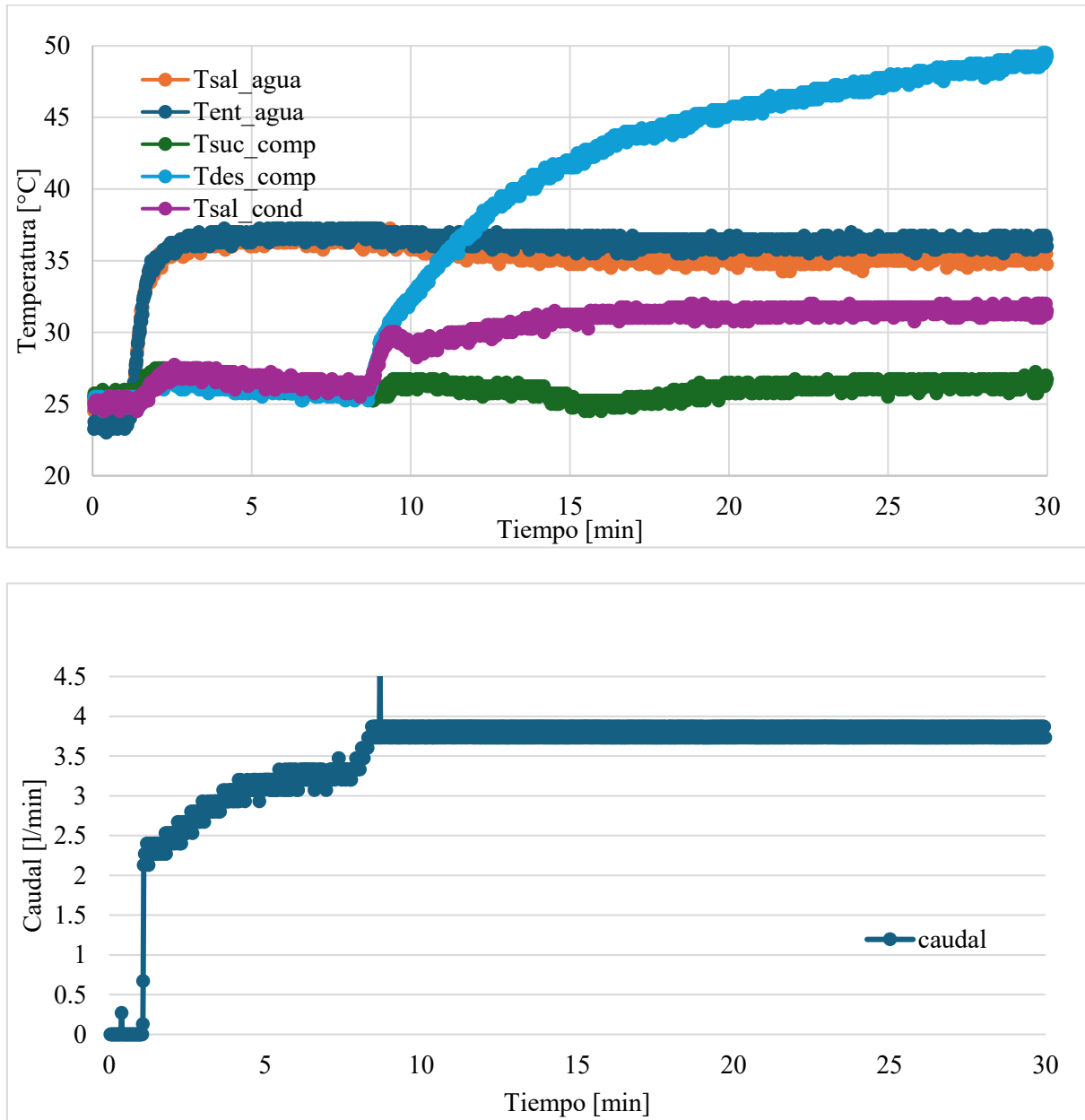
Rango 17 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 50**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 2*



**Tabla 34**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 2*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	35.20	36.28	26.38	47.67	31.53	3.81
<b>Valor. min</b>	34.25	35.50	25.50	45.25	30.75	3.73
<b>Valor. máx</b>	35.75	37.00	27.25	50.00	32.00	3.87
<b>Desviación estándar</b>	0.24	0.26	0.26	1.19	0.24	0.07

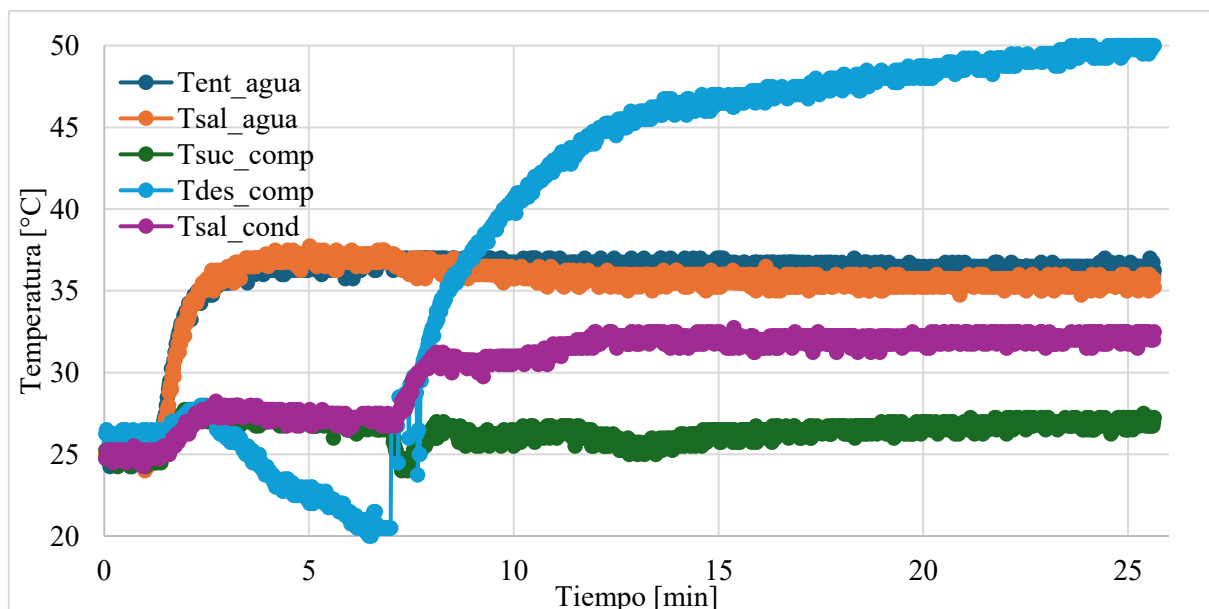
Rango 20 a 31 minutos

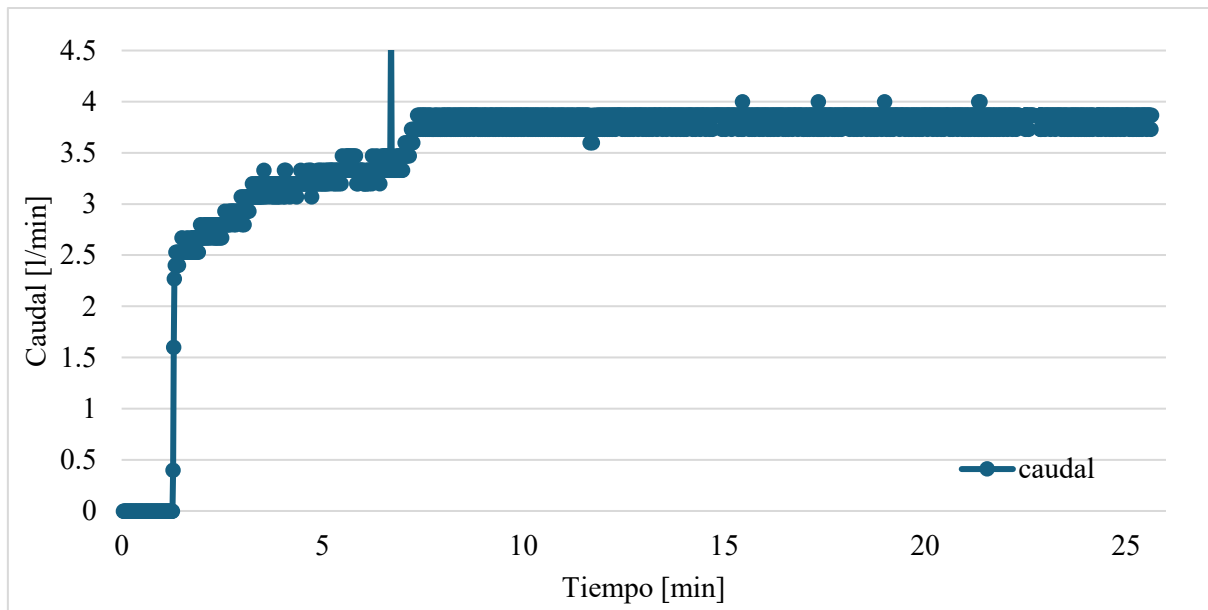
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 51**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 35**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	36.32	35.56	26.79	48.97	32.12	3.85
<b>Valor. min</b>	35.50	34.75	26.00	47.25	31.25	3.73
<b>Valor. máx</b>	37.00	36.00	27.50	50.50	32.50	4.00
<b>Desviación estándar</b>	0.27	0.24	0.26	0.71	0.26	0.06

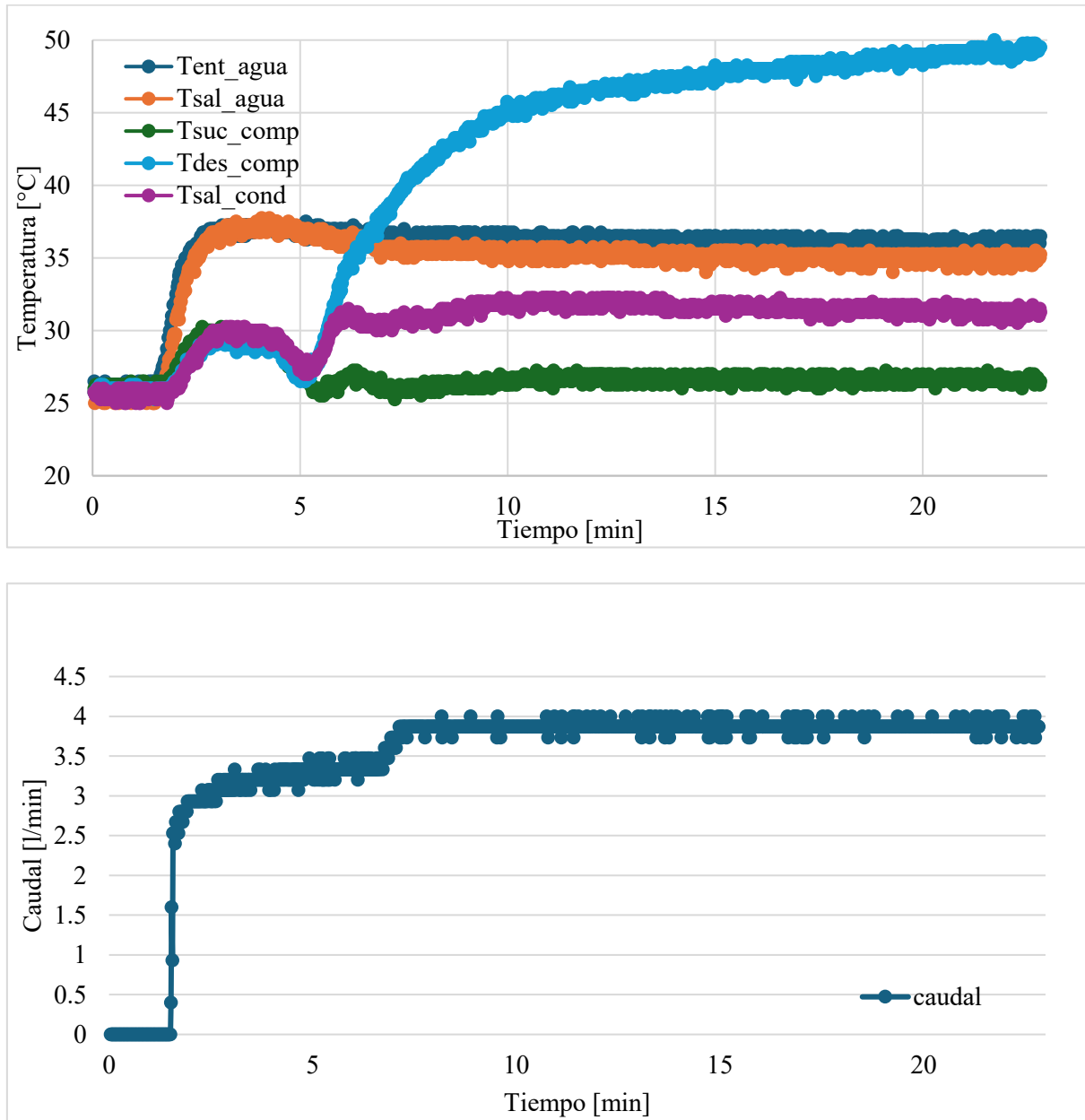
Rango 18 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 52**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 3.775 [l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 36**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 3.775*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 2*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	36.10	35.00	26.62	48.46	31.46	3.87
<b>Valor. min</b>	35.25	34.00	26.00	46.75	30.50	3.73
<b>Valor. máx</b>	36.50	35.50	27.25	50.00	32.25	4.00
<b>Desviación estándar</b>	0.26	0.29	0.23	0.65	0.28	0.05

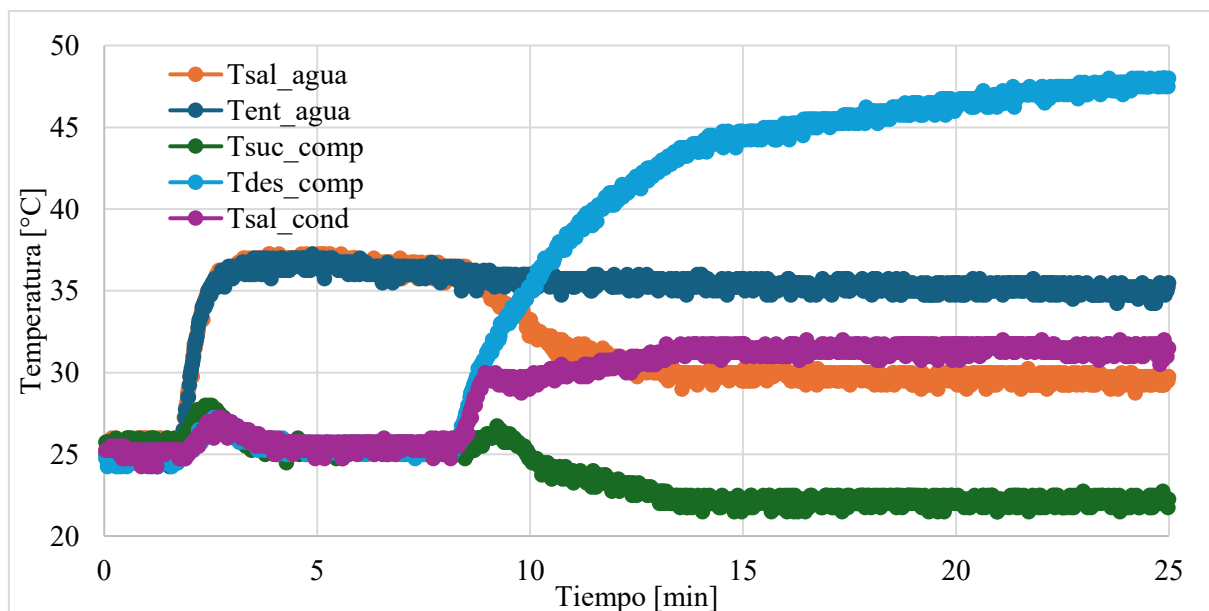
Rango 14 a 22 minutos

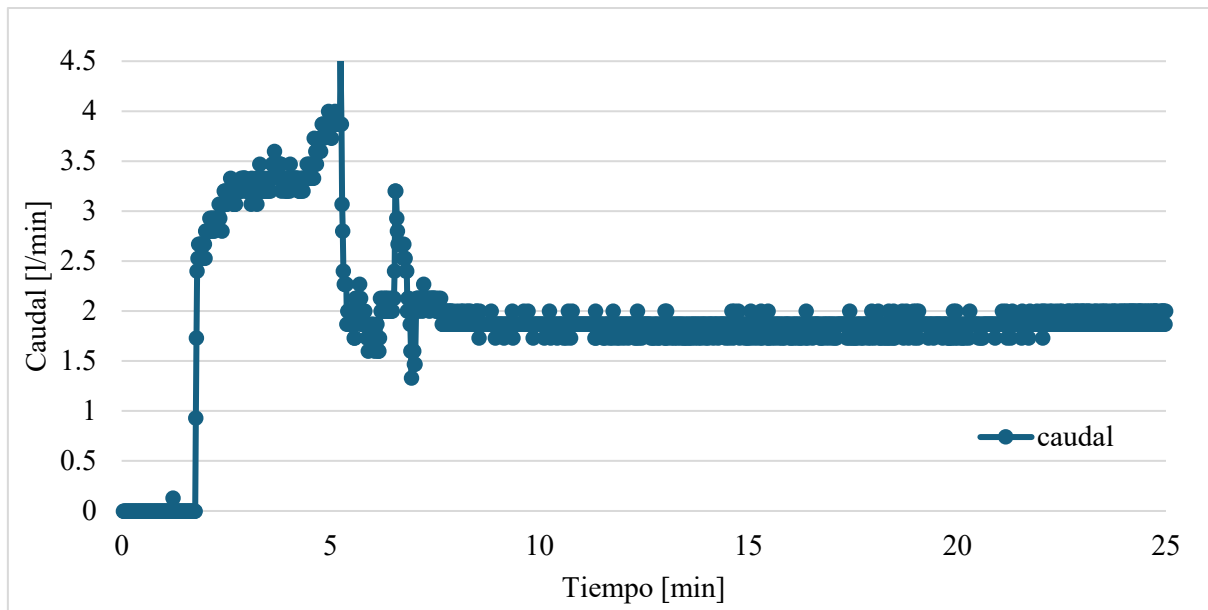
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 53**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 1*



**Tabla 37**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 1*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	29.67	35.18	22.15	46.58	31.48	1.88
<b>Valor. min</b>	28.75	34.25	21.50	44.25	30.50	1.73
<b>Valor. máx</b>	30.25	35.75	22.75	48.00	32.00	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.27	0.24	0.85	0.25	0.07

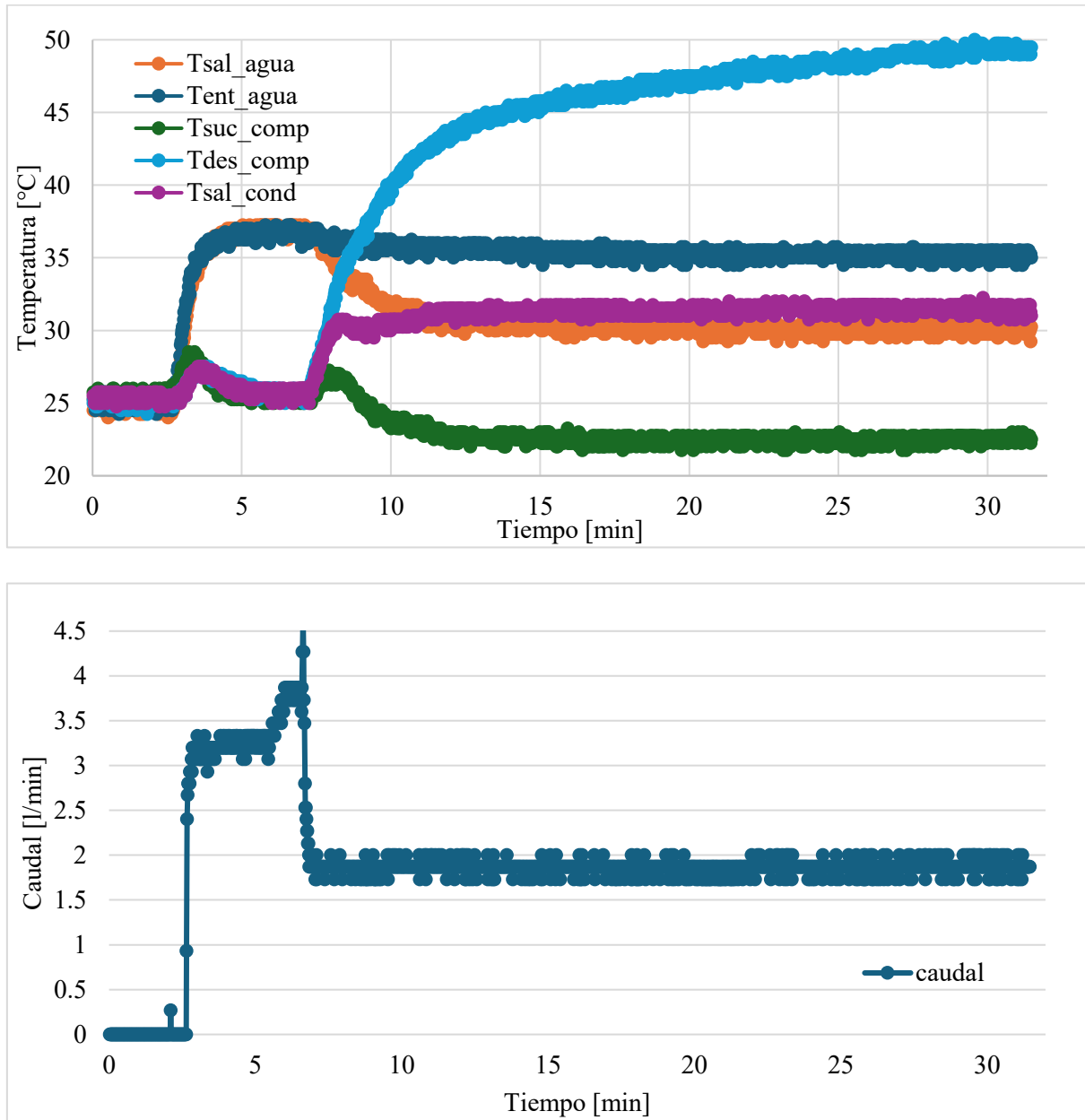
Rango 16 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 54**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min]*

*y flujo paralelo, Toma 2*



**Tabla 38**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo paralelo, Toma 2*

	Tsal_agua [°C]	Tent_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	30.07	35.23	22.47	48.56	31.47	1.87
<b>Valor. min</b>	29.25	34.50	21.75	46.75	30.75	1.73
<b>Valor. máx</b>	30.50	35.75	23.00	50.00	32.25	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.25	0.22	0.68	0.24	0.06

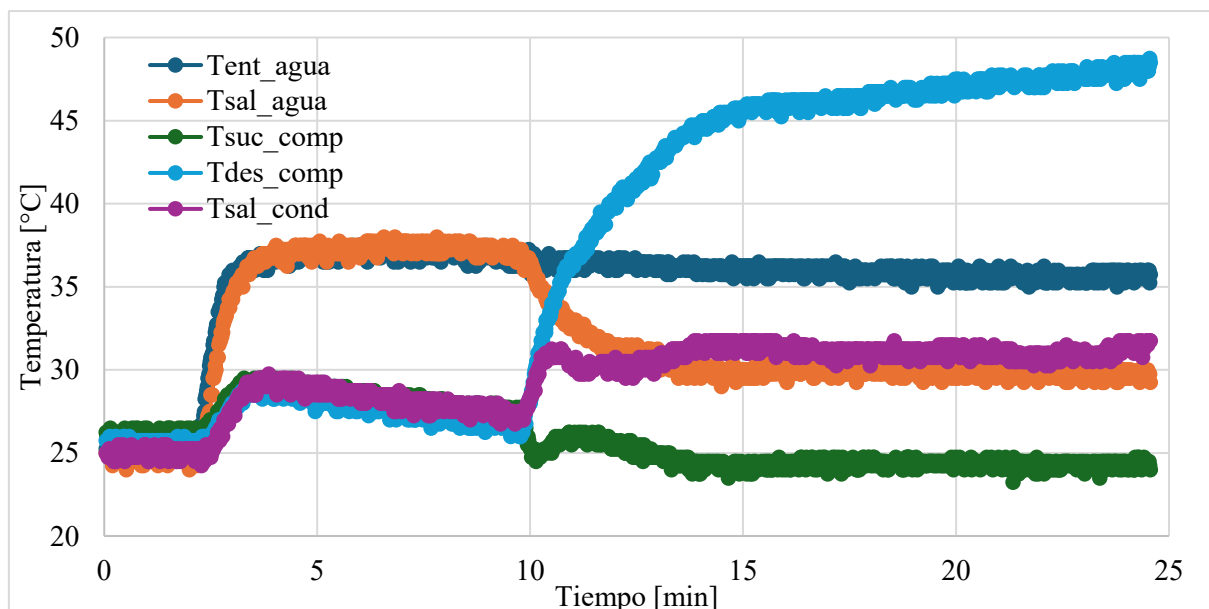
Rango 20 a 30 minutos

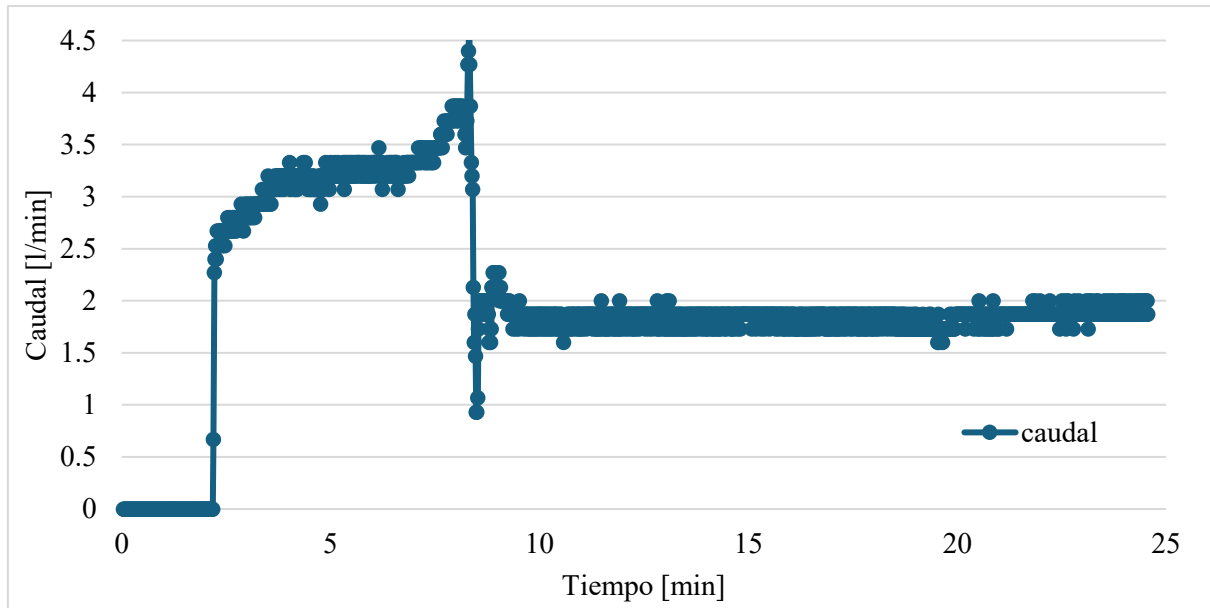
*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 55**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 1*



**Tabla 39**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 1*

	Tent_agua [°C]	Tsal_agua [°C]	Tsuc_comp [°C]	Tdes_comp [°C]	Tsal_cond [°C]	Caudal [l/min]
<b>Promedio</b>	35.77	29.90	24.35	47.09	31.06	1.84
<b>Valor. min</b>	35.00	29.25	23.25	45.50	30.25	1.60
<b>Valor. máx</b>	36.50	30.50	24.75	48.75	31.75	2.00
<b>Desviación estándar</b>	0.28	0.29	0.23	0.71	0.30	0.08

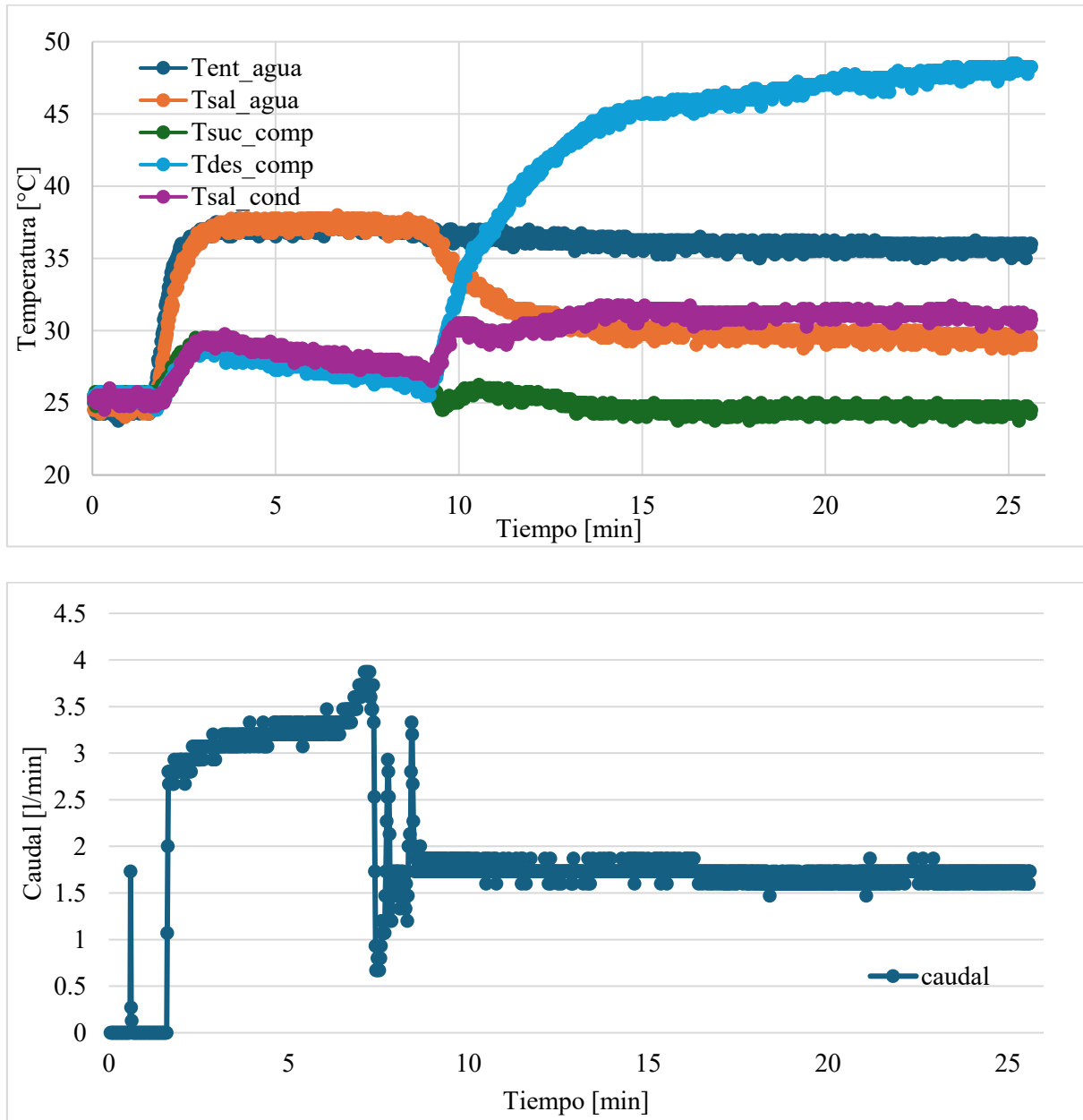
Rango 16 a 24 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

**Figura 56**

*Comportamiento estacionario del sistema en condiciones de 35°C, caudal 0.696[l/min]*

*y flujo contracorriente, Toma 2*



**Tabla 40**

*Datos de temperatura registrados durante la experimentación a 35°C, caudal 0.696*

*[l/min] y flujo contracorriente, Toma 2*

	<b>Tent_agua</b> [°C]	<b>Tsal_agua</b> [°C]	<b>Tsuc_comp</b> [°C]	<b>Tdes_comp</b> [°C]	<b>Tsal_cond</b> [°C]	<b>Caudal</b> [l/min]
<b>Promedio</b>	35.85	29.69	24.49	47.11	31.10	1.69
<b>Valor. min</b>	35.00	28.75	23.75	45.00	30.25	1.47
<b>Valor. máx</b>	36.50	30.25	25.00	48.50	31.75	1.87
<b>Desviación estándar</b>	0.26	0.31	0.24	0.82	0.24	0.07

Rango 16 a 25 minutos

*Nota.* Adaptado de: Autores.

Apéndice C. Ficha técnica de compresor Masterflux

**CASCADE17-0342Y3**  
**R134a**  
**48 V DC**  
**VARIABLE SPEED**



**Brushless DC Variable Speed Compressor Technical Data Sheet**

**General Information**

Compressor Part Number (Stationary)	CASCADE0008	(140 per pallet)
Compressor Part Number (Mobile)	CASCADE1008	(140 per pallet)
Compressor Drawing	DCMX17	
24V Controller Part Number	030F0152	
24V Controller Part Number	030F0189	
48V Controller Part Number	030F0137	
48V Controller Part Number	030F0192	
48V Controller Part Number	030F0175	
Wiring Diagram Drawing	DEM0028	

**Application Information**

Application	LBP/MBP/HBP
Refrigerant	R134a
Evaporator Temperature Range	-40° F to 59° F (-40° C to 15° C)
Condenser Temperature Range	80° F to 150° F (26.7° C to 65.6° C)

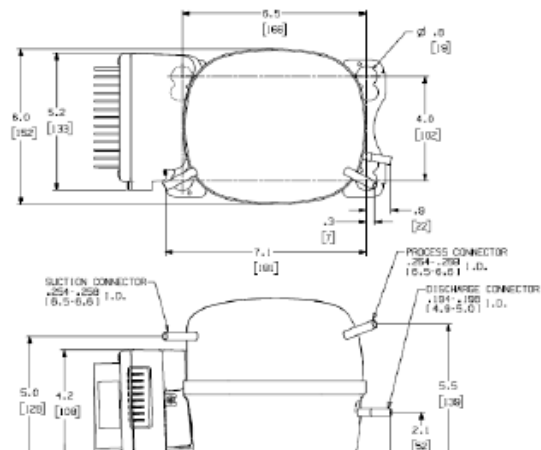
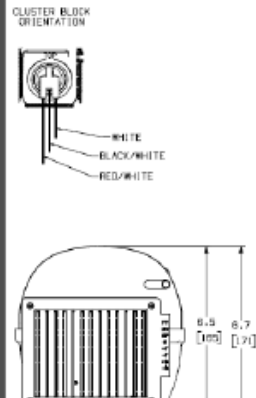
**Design**

Displacement	5.80 cm <sup>3</sup> (0.342 in <sup>3</sup> )
Oil Quantity	270 ml
Oil Type	POE 32cSt
Weight - Compressor/Controller	6.87 kg / 14.7 lb

**Battery Protection**

	24V			48V		
	Min.	Nominal	Max.	Min.	Nominal	Max.
Under Voltage Shutdown	18.0	19.0	20.0	34.0	36.0	37.0
Over Voltage Shutdown	29.0	30.0	31.0	59.0	60.0	61.0

**Compressor Dimensions**



**CASCADE17-0342Y3****Compressor Rating Data****LBP**

Specification	ASHRAE	CECOMAF	SPEER
Voltage (VDC)	48	48	48
RPM	4200	4200	4200
Evap. Temp. (°F/°C)	-10°F / -23.3°C	-13°F / -25.0°C	-10°F / -23.3°C
Cond. Temp. (°F/°C)	130°F / 54.4°C	131°F / 55.0°C	105°F / 40.6°C
Ambient Temp. (°F/°C)	90°F / 32.2°C	90°F / 32.2°C	90°F / 32.2°C
Suction Temp. (°F/°C)	90°F / 32.2°C	90°F / 32.2°C	90°F / 32.2°C
Liquid Temp. (°F/°C)	90°F / 32.2°C	131°F / 55.0°C	90°F / 32.2°C
Cooling Capacity (BTU/watt)	621.13 / 182.036	430.25 / 126.094	714.18 / 209.305
Power (watt)	140.80	115.20	124.80
Current (amp)	2.93	2.40	2.60
Efficiency (EER/COP)	4.41 / 1.29	3.73 / 1.09	5.72 / 1.68


**MBP**

Specification	ASHRAE	ARI
Voltage (VDC)	48	48
RPM	4200	4200
Evap. Temp. (°F/°C)	20°F / -6.7°C	20°F / -6.7°C
Cond. Temp. (°F/°C)	130°F / 54.4°C	120°F / 48.9°C
Ambient Temp. (°F/°C)	95°F / 35.0°C	95°F / 35.0°C
Suction Temp. (°F/°C)	95°F / 35.0°C	40°F / 4.4°C
Liquid Temp. (°F/°C)	115°F / 46.1°C	120°F / 48.9°C
Cooling Capacity (BTU/watt)	1347.69 / 394.969	1286.27 / 376.969
Power (watt)	225.60	220.80
Current (amp)	4.70	4.60
Efficiency (EER/COP)	5.97 / 1.75	5.83 / 1.71

**HBP**

Specification	ASHRAE	ARI
Voltage (VDC)	48	48
RPM	3850	3850
Evap. Temp. (°F/°C)	45°F / 7.2°C	45°F / 7.2°C
Cond. Temp. (°F/°C)	130°F / 54.4°C	130°F / 54.4°C
Ambient Temp. (°F/°C)	95°F / 35.0°C	95°F / 35.0°C
Suction Temp. (°F/°C)	95°F / 35.0°C	65°F / 18.3°C
Liquid Temp. (°F/°C)	115°F / 46.1°C	115°F / 46.1°C
Cooling Capacity (BTU/watt)	2570.10 / 753.22	2288.94 / 670.82
Power (watt)	288.00	278.40
Current (amp)	6.00	5.80
Efficiency (EER/COP)	8.92 / 2.62	8.22 / 2.41

## Apéndice D. Ficha técnica del compresor QDZH65G

	Ficha técnica	Rev.: 0	Fecha: Marzo 2023
	906586 Motoc."BlueStar"12/24V CC-QDZH65G-120W--	Página 1 de 6	




## 1. APLICACIÓN

RANGO DE TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN	-35~-15°C
TIPO DE REFRIGERACIÓN	F
CONTROL DE REFRIGERACIÓN	CAPILAR
RANGO DE VOLTAJE	12/24(CC)
REFRIGERANTE	R134a

## 2. RENDIMIENTO NOMINAL Y CONDICIONES DE PRUEBA

VELOCIDAD DE ROTACIÓN	CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO	EFICIENCIA: COP
2000(rpm)	120,0(W)	1.2(W/W)
2500(rpm)	150,0(W)	1.2(W/W)

	<b>Ficha técnica</b>	Rev.: 0	Fecha: Marzo 2023
	906586 Motoc. "BlueStar"12/24V CC-QDZH65G-120W--	Página 2 de 6	

3000(rpm)	180,0(W)	1.2(W/W)
3500(rpm)	210,0(W)	1.2(W/W)
CONDICIÓN DE PRUEBA DE ASHRAE		LBP
FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE PRUEBA		12/24(CC)
TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN		-23,3°C
TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN		54,4°C
TEMPERATURA DE SUCCIÓN		32,2°C
TEMPERATURA DE SUBENFRIAMIENTO		32,2°C
TEMPERATURA AMBIENTE		32,2°C

### 3、 ESTRUCTURA PRINCIPAL

TIPO DE COMPRESOR	MOTOR-COMPRESOR HERMTIC
TIPO DE BOMBA	TIPO ALTERNATIVO
TIPO DE ACEITE	22 #
CARGA DE ACEITE	180ml
PINTURA	PINTURA NEGRA, HORNEADA
PESO NETO	6,2 Kg
ID DEL TUBO DE SUCCIÓN	Ø6.2±0.1
ID DEL TUBO DE DESCARGA	Ø5.1±0.1
ID DEL TUBO DE PROCESO	Ø6.2±0.1
IMPUREZAS RESIDUALES	80mg MAX
HUMEDAD RESIDUAL	100mg MAX

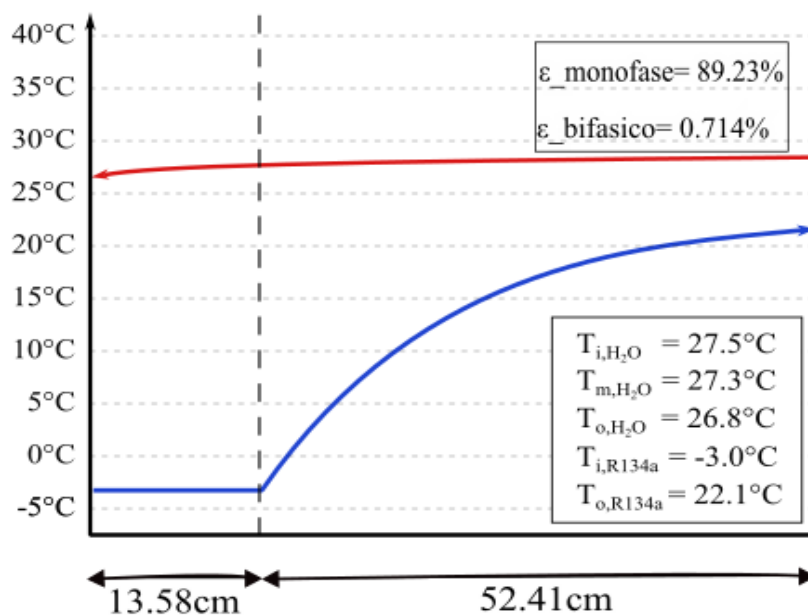
### Apéndice E. Análisis matemático de otros experimentos

A continuación, se presentan los perfiles de temperatura, así como los diagramas P-h resultantes de las pruebas de las combinaciones experimentales en adición a los presentados en la sección 4.2.

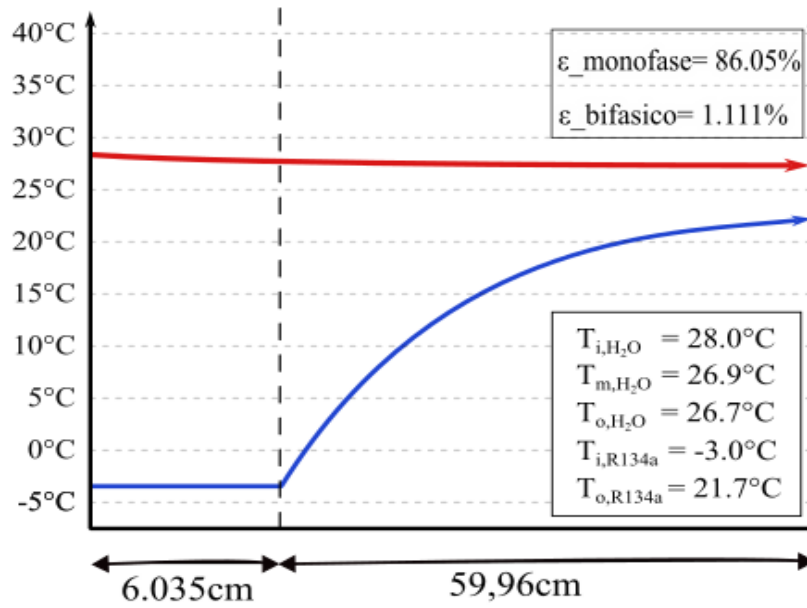
La Figura 57 y Figura 58 incluyen los perfiles de temperatura correspondientes a las condiciones de operación de 25 °C y 35°C para un caudal de 3,77 [l/min], en las configuraciones de flujo: paralelo y contraflujo. Además, de la Figura 59 hasta la Figura 61 se presentan los diagramas P-h en donde se aprecia que los experimentos con condición de caudal 0.696 [l/min], presentan una leve diferencia en su diagrama en régimen paralelo y contraflujo, contraflujo teniendo un mayor sobrecalentamiento, por otra parte, los experimentos realizados a caudal de 3.775 [l/min], en ambas configuraciones no se aprecian cambios significativos.

**Figura 57**

*Perfil de temperaturas a 25°C para flujo contracorriente y paralelo a caudal de 3.775[l/min]*



(a)

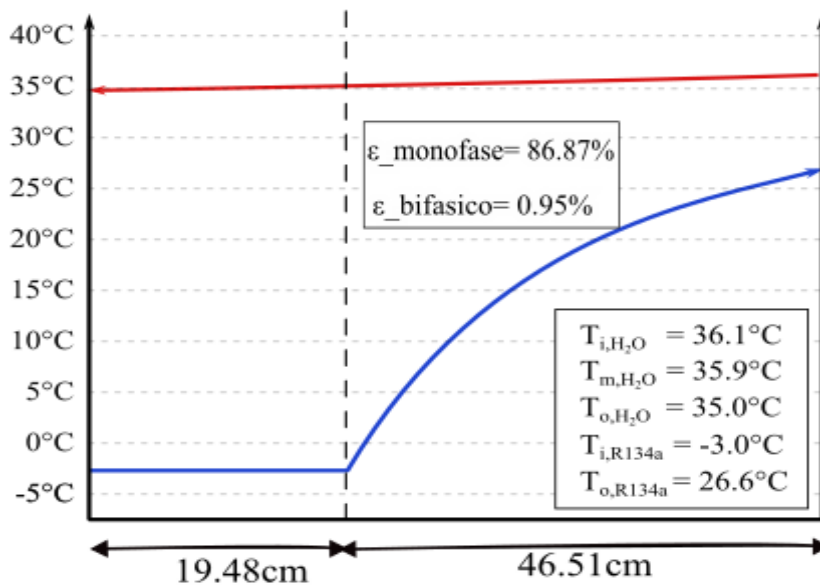


(b)

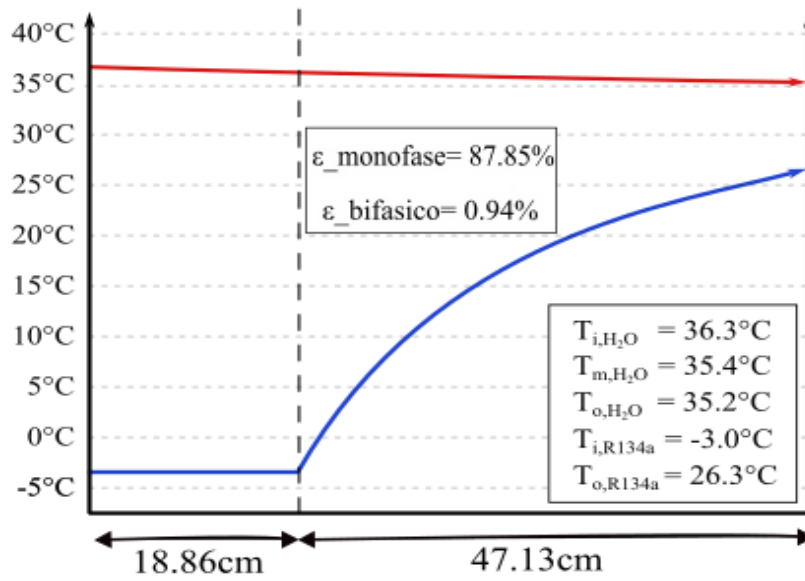
Nota. (a) Perfil para flujo contracorriente. (b) Perfil para flujo paralelo.

### Figura 58

Perfil de temperaturas a  $35^\circ\text{C}$  para flujo contracorriente y paralelo a caudal de  $3.775[\text{l/min}]$



(a)

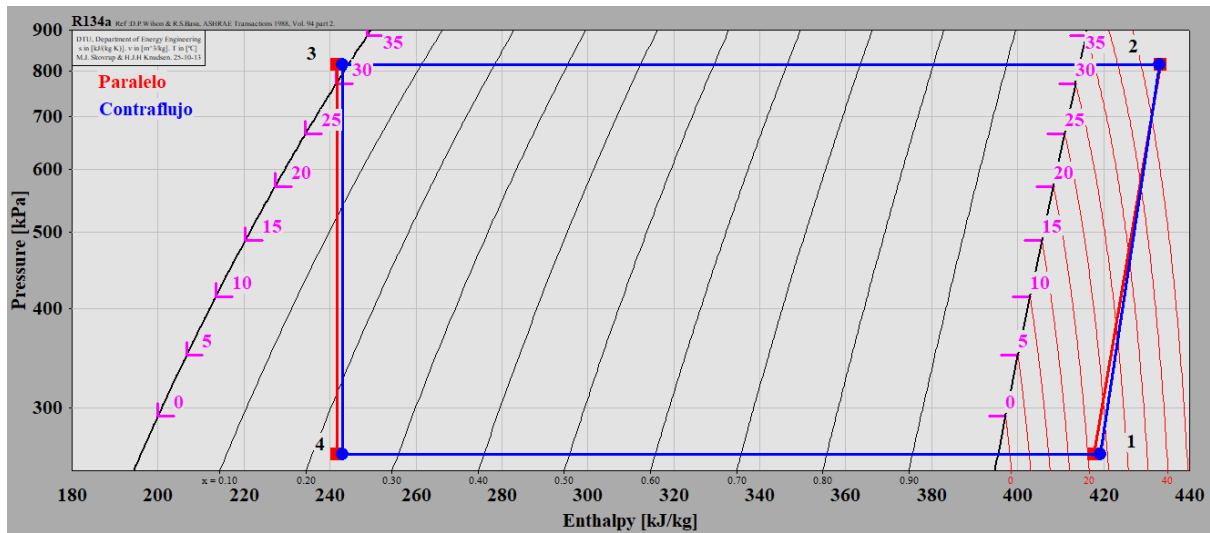


(b)

Nota. (a) Perfil para flujo contracorriente. (b) Perfil para flujo paralelo.

**Figura 59**

Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 35[°C] y caudal de 0,696 [l/min].



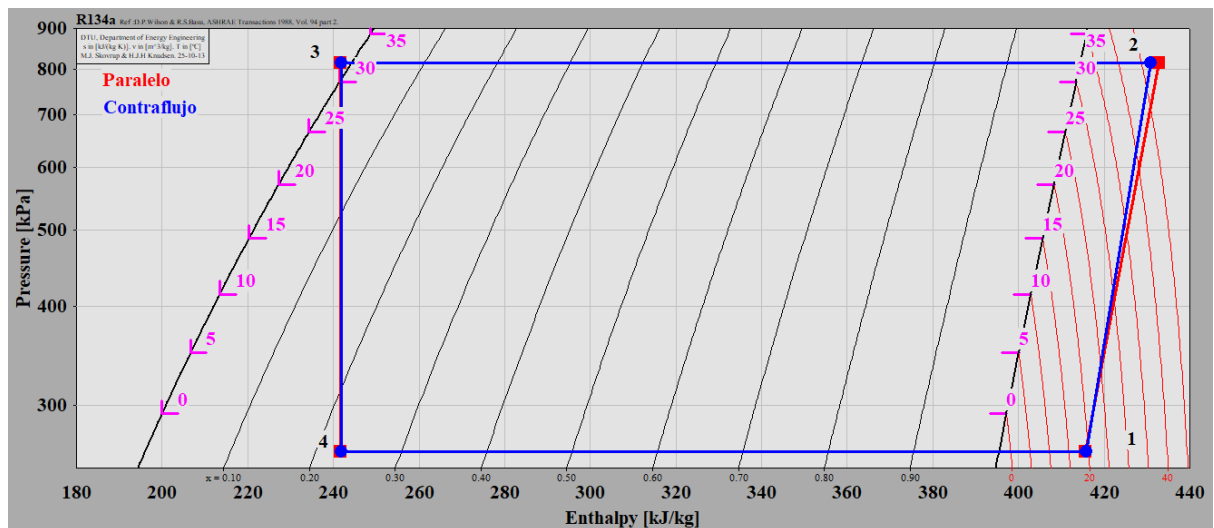
**Tabla 41**

Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 35 [°C] y caudal de 0,696 [l/min].

Punto	PARALELO		CONTRAFLUJO	
	Presión[kPa]	Temperatura[°C]	Presión[kPa]	Temperatura[°C]
1	263.1	22.47	263.1	24.49
2	814.6	48.56	814.6	47.11
3	814.6	31.47	814.6	31.10
4	263.1	-----	263.1	-----

**Figura 60**

Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 25[°C] y caudal de 3.775 [l/min].



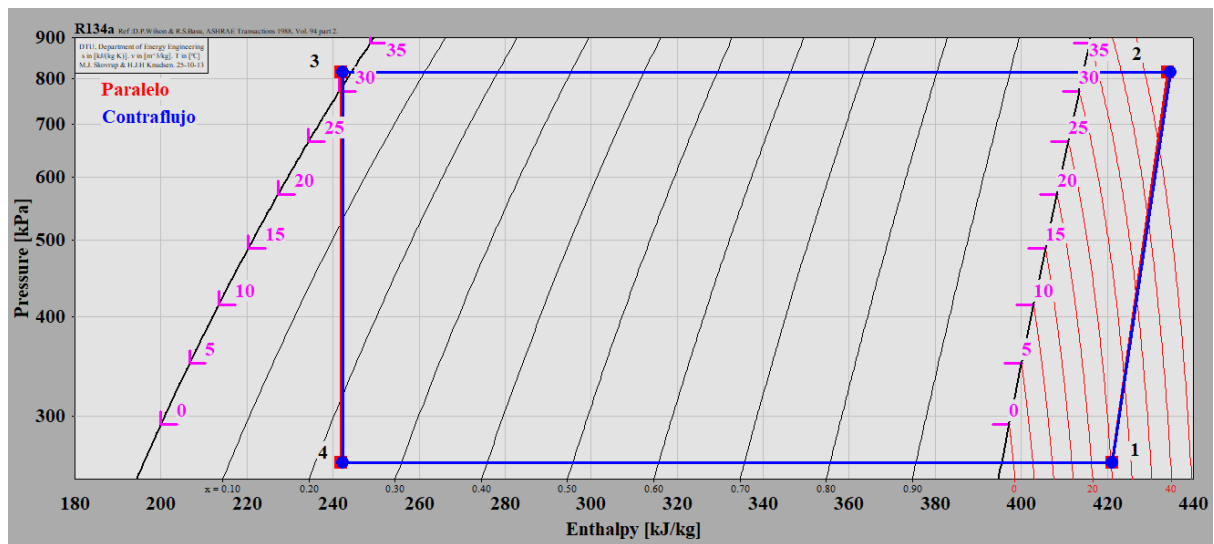
**Tabla 42**

Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 25 [°C] y caudal de 3,77 [l/min].

Punto	PARALELO		CONTRAFLUJO	
	Presión[kPa]	Temperatura[°C]	Presión[kPa]	Temperatura[°C]
1	263.1	21.76	263.1	22.08
2	814.6	47.19	814.6	46.32
3	814.6	31.28	814.6	30.69
4	263.1	-----	263.1	-----

**Figura 61**

Comparación de ciclo de compresión en régimen paralelo vs contraflujo a 35[°C] y caudal de 3.775 [l/min].



**Tabla 43**

*Datos experimentales de presión y temperatura para las configuraciones de flujo paralelo y contraflujo a 35 [°C] y caudal de 3,77 [l/min].*

Punto	PARALELO		CONTRAFLUJO	
	Presión[kPa]	Temperatura[°C]	Presión[kPa]	Temperatura[°C]
1	263.1	26.38	263.1	26.62
2	814.6	47.67	814.6	48.46
3	814.6	31.53	814.6	31.46
4	263.1	-----	263.1	-----

## Apéndice F. Guía para el desarrollo de la práctica del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos

Laboratorio de Sistemas Térmicos-Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Universidad Industrial de Santander  
 II Semestre Académico 2025



### Determinación de la Efectividad en un Intercambiador de Calor de Tubos Concéntricos

Método  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD



En esta guía se presentan las directrices a seguir para evaluar el desempeño termodinámico en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. En el desarrollo de esta práctica, el estudiante debe implementar competencias que permitan determinar la efectividad para los diferentes arreglos que se pueden dar en este tipo de intercambiador. Para ello se emplearán los métodos de  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD. Con el fin de hallar los parámetros que rigen cada método se tomarán medidas de la temperatura de los fluidos en los puertos de entrada y salida del intercambiador, así como también los datos del flujo de agua que circula por la cámara anular del intercambiador.

#### 1. Introducción

Uno de los dispositivos de ingeniería con mayor presencia en los diferentes sectores industriales es el intercambiador de calor, el cual puede encontrarse en múltiples configuraciones y diseños dependiendo de la aplicación a la que esté destinado.

Dada su importancia en la transferencia de energía entre fluidos, resulta fundamental evaluar su desempeño termodinámico, ya que de este depende directamente la eficiencia global de los sistemas térmicos donde se implementa. Para ello, se analizan parámetros clave como la efectividad térmica, el coeficiente global de transferencia de calor y las pérdidas de energía, los cuales permiten cuantificar el rendimiento del intercambiador bajo diferentes condiciones operativas y garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

En el caso de los intercambiadores de tubos concéntricos, el análisis se centra principalmente en dos configuraciones: flujo paralelo y contracorriente. Estas disposiciones están gobernadas por métodos matemáticos mencionados a continuación:

El **método F-LMTD (Diferencia de Temperatura media logarítmica)** parte del conocimiento de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos,

permitiendo determinar la tasa de transferencia de calor a partir de la siguiente expresión:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (1)$$

- $Q$ : Tasa de transferencia de calor [W].
- $U$ : Coeficiente global de transferencia de calor [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ].
- $A$ : Área de intercambio térmico [ $\text{m}^2$ ].
- $\Delta T_{lm}$ : Diferencia de temperatura media logarítmica, definida por:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln \left( \frac{T_{h,i} - T_{c,i}}{T_{h,o} - T_{c,o}} \right)} \quad (2)$$

- $T_{h,i}, T_{h,o}$ : Temperaturas de entrada y salida del fluido caliente.
- $T_{c,i}, T_{c,o}$ : Temperaturas de entrada y salida del fluido frío.

Por otra parte, el **método de Efectividad-NTU** permite calcular el desempeño del intercambiador sin conocer previamente las temperaturas de salida de los fluidos. Este se basa en las siguientes relaciones:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3)$$

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{\min}} \quad (4)$$

Donde:

- $\varepsilon$  es la efectividad térmica.
- $Q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})$
- $C_{\min}$  es la menor capacidad calorífica entre los dos fluidos involucrados.

En resumen, tanto el método F-LMTD como el de Efectividad-NTU ofrecen enfoques distintos para analizar el comportamiento térmico de los intercambiadores de tubos concéntricos. La selección entre uno u otro dependerá de la información disponible y del propósito del análisis.

### 1.1. Objetivos

- Determinar la eficiencia térmica del sistema para los arreglos de flujo paralelo y cruzado por medio de los métodos  $\varepsilon$ -NTU y F-LMTD.
- Construir el diagrama característico de Mollier para el R134a presente en el ciclo de refrigeración por compresión.
- Colocar a prueba los fundamentos teóricos asociados a los Intercambiadores de calor de tubos Concéntricos.

## 2. Materiales y Método

### 2.1. Materiales

El banco de pruebas presentado en la figura 1 se puede dividir en tres subsistemas principales: Sistema hidráulico de bombeo, Sistema de Refrigeración y

Sistema de control de temperatura y adquisición de datos.



**Figura 1:** Banco de Pruebas de Intercambiadores de Calor Tubos Concéntricos

A continuación se presentan los componentes principales de cada subsistema:

#### Sistema Hidráulico de Bombeo

- Bomba Centrífuga y accesorios (válvulas, mangueras, codos, tubería PVC).
- Tanque de almacenamiento de Agua.
- Flujómetro para la medición de caudal en LPM (YF-S201).
- Agitador Mecánico.

### Sistema de Control de Temperatura y adquisición de datos

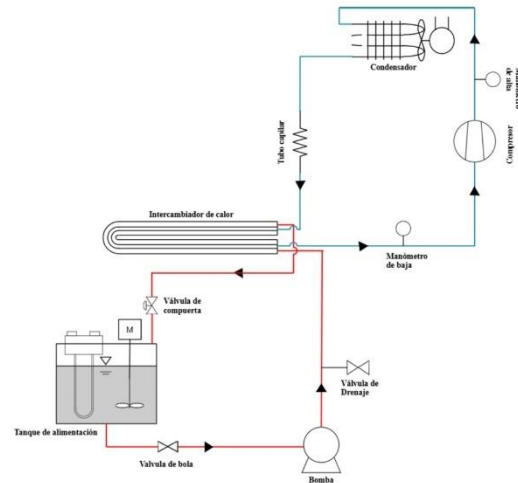
- Termocupla tipo K.
- Indicador de Temperatura Digital Autonic-TZN4S.
- Modulo Max6675.
- Cables de conexión tipo macho(jumpers).
- Protoboard.
- Placa de Adquisicion Arduino Uno.
- Computadora con el software Arduino IDE instalado.

### Sistema de refrigeración

- Compresor modelo QDZH65G.
- Tubo Capilar.
- Condensador.
- Evaporador.

## 2.2. Procedimiento experimental

En la figura 2 se presenta un diagrama esquemático del banco para la determinación de la efectividad en cada uno de los arreglos que se pueden dar, así como también se identifican los componentes principales de este.



**Figura 2:** Diagrama Esquemático del Banco de Pruebas de Intercambiadores de Calor de Tubos Concéntricos

A continuación, se detalla el procedimiento experimental para la adquisición y el monitoreo de los datos, con los cuales se procederá a la elaboración del diagrama de Mollier:

1. Antes de encender el banco es necesario verificar que el nivel del agua en el tanque se encuentre en lo establecido. (Recomendado : )
2. Verifique que las válvulas, tanto la de salida del tanque como la de drenaje se encuentren cerradas (Perpendicular con la línea).
3. Energizar el banco de pruebas conectando el cable al tablero de control y encender el controlador, definiendo la temperatura a la cual se desea mantener el agua.
4. Encender simultáneamente la resistencia eléctrica y el agitador para asegurar la homogenización



- de la temperatura del agua. Luego, esperar hasta que se alcance la temperatura deseada, según lo indicado en el controlador.
5. Una vez alcanzada la temperatura abrir la válvula de salida del tanque y esperar 1 minuto. Agregar agua al tanque hasta el nivel recomendado.
  6. Encender la bomba y esperar un lapso de 30 segundos para que el agua circule por el sistema.
  7. Posteriormente, activar de forma conjunta el condensador y el compresor, permitiendo que el sistema opere durante un periodo de tiempo prudente hasta alcanzar condiciones de funcionamiento estables.
  8. Realizar la conexión de los módulos max6675 y termopares tipo K al Arduino uno.
  9. Cargar el código o script a la placa Arduino y verificar mediante el monitor serial si las lecturas de temperatura y caudal son coherentes.
  10. Abrir el código (script) en lenguaje de programación Python (Datosexcel.py) utilizado para almacenar y graficar los datos adquiridos por la placa de Arduino.
  11. Configurar en el código mostrado en la Figura el puerto de comunicación serial, la velocidad de transmisión (baud rate), el nombre del archivo de salida en formato .csv, así como el número de muestras a registrar.
  12. Ejecutar el código para iniciar el proceso de adquisición de datos (Figura ).
  13. Al terminar de tomar los datos, apagar la resistencia eléctrica, el compresor, el condensador y por último la bomba. Luego, cerrar la válvula de salida del tanque. (Si desea drenar el tanque dejar abierta).
  14. Por último, abrir la válvula de drenaje para evacuar el agua almacenada en el interior de la bomba.

### 3. Resultados y Discusiones

Los datos experimentales obtenidos durante el desarrollo de la práctica se utilizarán para evaluar el rendimiento térmico del intercambiador de calor de tubos concéntricos, bajo las configuraciones de flujo paralelo y contra-flujo. A partir de las temperaturas medidas en los puntos de entrada y salida de los fluidos, así como del caudal del agua, se calcularán parámetros clave como la efectividad térmica y el coeficiente global de transferencia de calor utilizando los métodos  $\epsilon$ -NTU y F-LMTD. Se analizarán las diferencias entre los resultados teóricos y experimentales, identificando posibles fuentes de error, limitaciones del montaje y su impacto sobre la precisión de los cálculos. Finalmente, se discutirán los comportamientos térmicos observados, permitiendo validar los fundamentos teóricos abordados en la guía.

#### Bibliografía Recomendada

- 1 Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa. McGraw Hill, 4a ed., 2011.
- 2 Autonics, T4N4S Series Catalog 5-Channel Digital Temperature Indicators, 2024.

**Apéndice G. Manual de operación del banco de intercambiadores de calor de tubos concéntricos**

# **Manual de operación y mantenimiento**

**Banco de intercambiador de calor de tubos concéntricos**

Universidad Industrial de Santander  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Laboratorio de Sistema térmico  
Bucaramanga  
2025

**Contenido**

INTRODUCCIÓN.....	144
1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....	145
1.1 Subsistema de alimentación.....	145
1.2 Subsistema de ciclo por compresión .....	147
1.3 Subsistema control.....	149
1.4 Subsistema adquisición de datos .....	151
2. INSTRUCCIONES DE USO .....	155
2.1 Antes de la puesta en marcha .....	155
2.2 Puesta en marcha .....	156
3. MANTENIMIENTO PREVENTIVO .....	158

## **Introducción**

Este manual proporciona una guía detallada para la operación y mantenimiento del banco de intercambiador de tubos concéntricos. Se incluyen instrucciones de la puesta en marcha y un plan de mantenimiento preventivo para el cuidado básico de los componentes del banco.

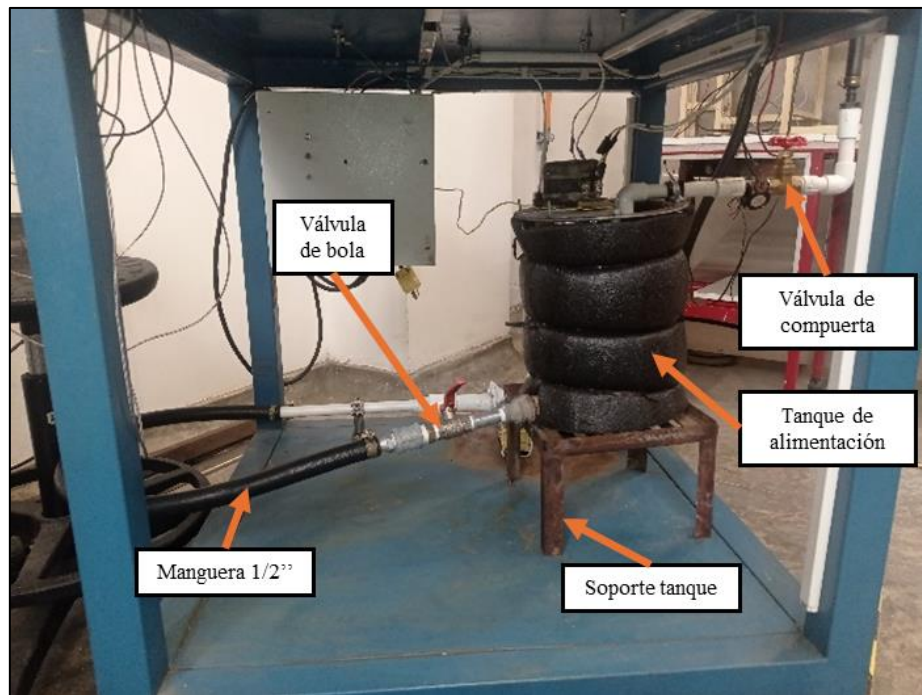
## 1. Descripción del equipo

El sistema está compuesto por 4 subsistemas sin contar la estructura que conforman el banco de intercambiador de tubos concéntricos.

### 1.1 Subsistema de alimentación de agua

Encargado del almacenamiento y transporte del agua como fluido de trabajo al intercambiador de calor. El subsistema incluye:

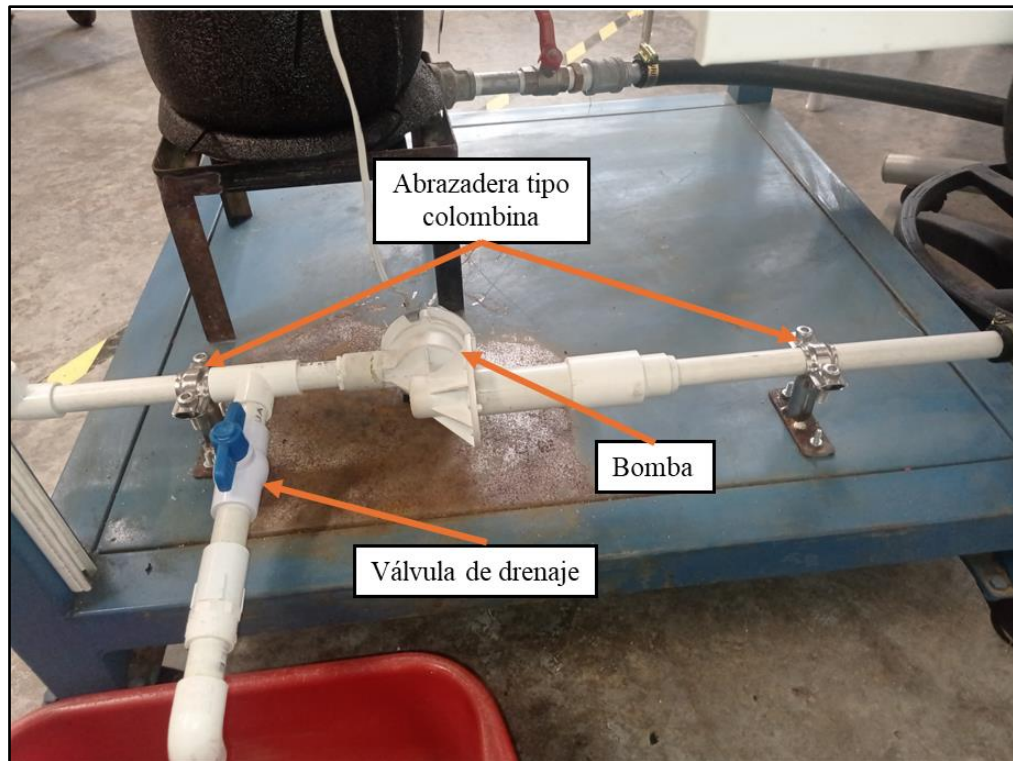
Elementos	Función
<b>Tanque de alimentación</b>	Almacena el agua.
<b>2 manguera termoplástica 3/4"</b>	Une el tanque de alimentación con la succión de la bomba.
<b>1 mangueras termoplásticas 1/2"</b>	Conecta la bomba con la entrada al intercambiador de calor y la salida del intercambiador de calor con el tanque de alimentación.
<b>Bomba de lavadora</b>	Bombea el fluido al intercambiador de calor.
<b>Válvula de bola en latón</b>	Apertura o cierre del tanque de alimentación.
<b>Válvula de bola en PVC (válvula de compuerta)</b>	Drenaje del sistema.
<b>Válvula de compuerta</b>	Ubicada en el retorno al tanque de alimentación, tara el flujo de trabajo.
<b>Soporte para tanque</b>	Sostiene el tanque para dar altura.
<b>2 abrazaderas tipo colombina</b>	Fijan la tubería en el sistema.
<b>Resistencia tubular vertical</b>	Mantiene la temperatura en el tanque de alimentación.
<b>Agitador</b>	Mezcla el agua para un calentamiento más efectivo.

**Figura 62***Elementos subsistema de alimentación de agua*

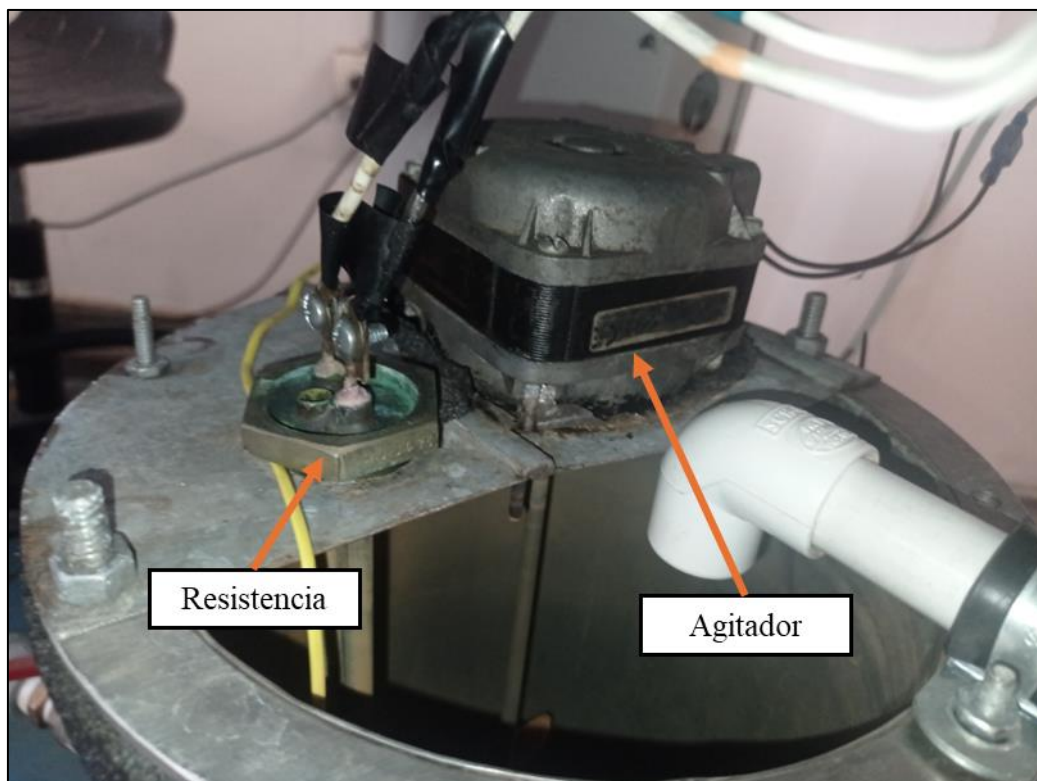
(a)



(b)



(c)



(d)

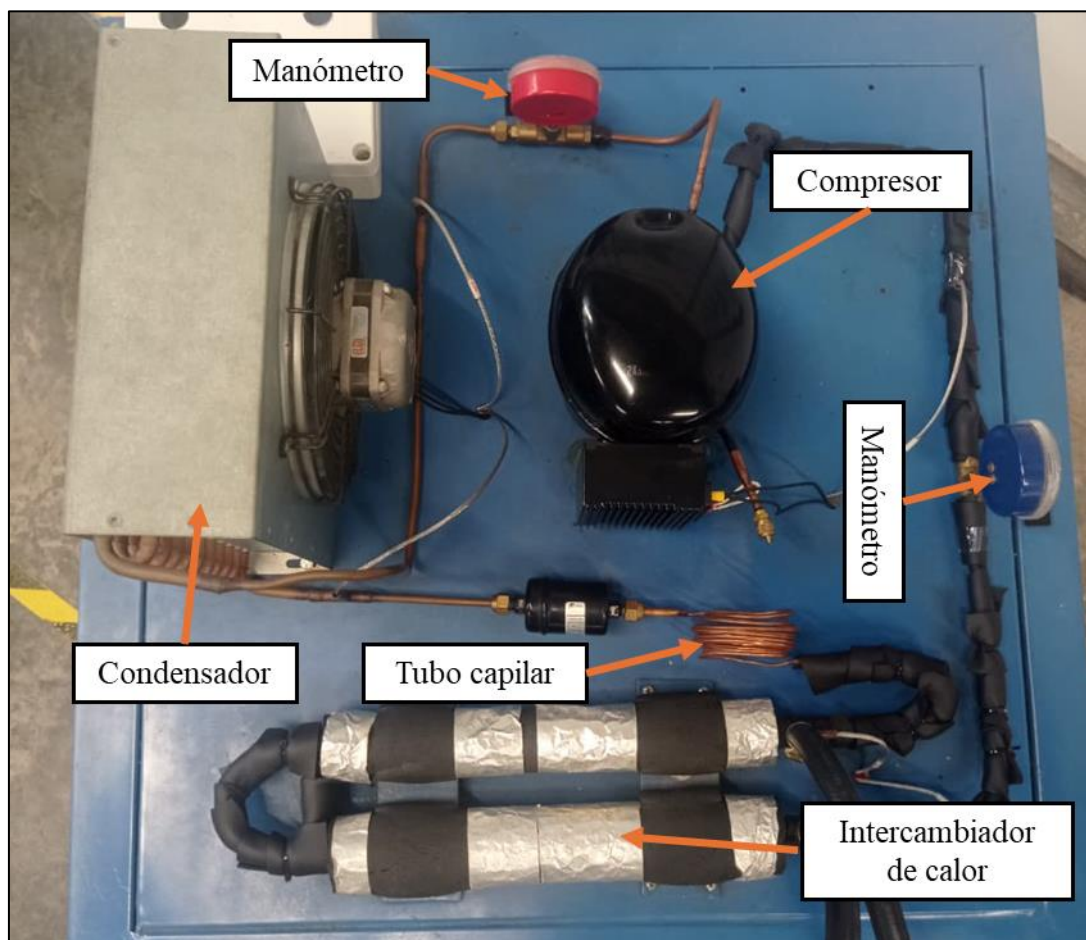
## 1.2 Subsistema de ciclo de refrigeración por compresión

Encargado del refrigerante como fluido de trabajo, conformado por:

Elementos	Función
<b>Compresor QDZH65G</b>	Comprimir el refrigerante en el sistema para aumentar su presión.
<b>Condensador</b>	Baja la temperatura del refrigerante liberando energía al ambiente, en la presión de alta.
<b>Tubo capilar</b>	Reduce la presión en el refrigerante.
<b>Intercambiador de calor de tubos concéntricos</b>	Transfiere calor entre los dos fluidos de trabajo.
<b>2 manómetros</b>	Toman la presión de baja y de alta en el sistema.

**Figura 63**

*Elementos subsistema de ciclo de refrigeración por compresión*



### 1.3 Subsistema control

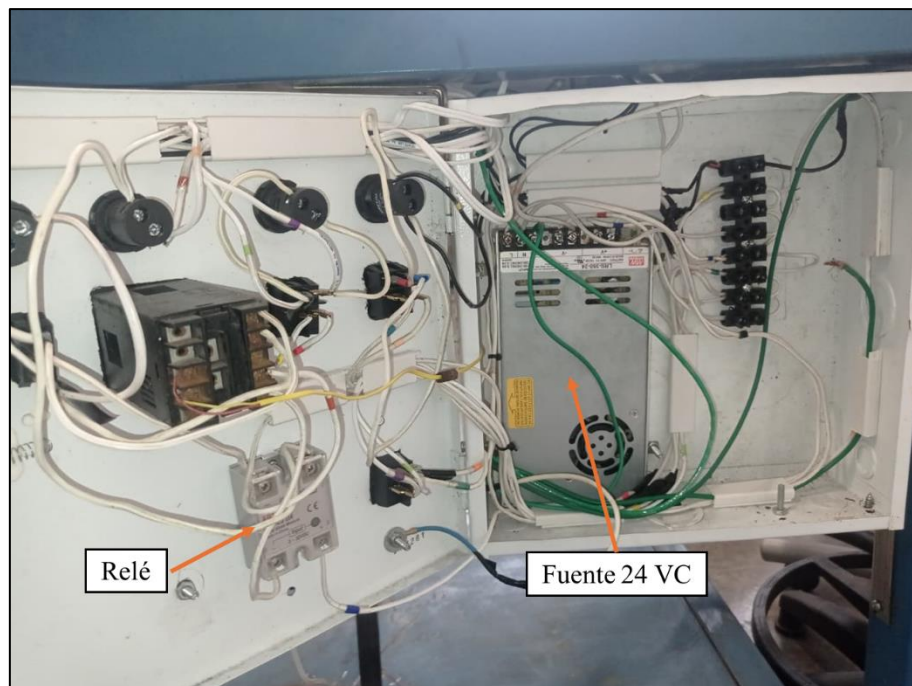
Controla el suministro de energía en todos los componentes del banco.

Conformado por:

<b>Elementos</b>	<b>Función</b>
<b>Caja de control</b>	Alberga todos los elementos del subsistema de control.
<b>4 pilotos luminosos</b>	Indicar el encendido del equipo en cuestión.
<b>2 interruptores sencillos de 3 pines luminosos</b>	Controlan el flujo de corriente eléctrica apagando o encendiendo el elemento.
<b>3 interruptores sencillos de 4 pines</b>	Controlan el flujo de corriente eléctrica apagando o encendiendo el elemento.
<b>Controlador Autonics TZN4S</b>	Modera la resistencia.
<b>Relé de estado solido</b>	Protege el controlador del alto consumo de la resistencia.
<b>Fuente de alimentación 24V</b>	Proporciona 24V el compresor y el relé de estado sólido.
<b>Termocupla tipo K</b>	Capta la temperatura en el tanque de agua para encender o apagar la resistencia.

**Figura 64***Elementos subsistema de control*

(a)



(b)

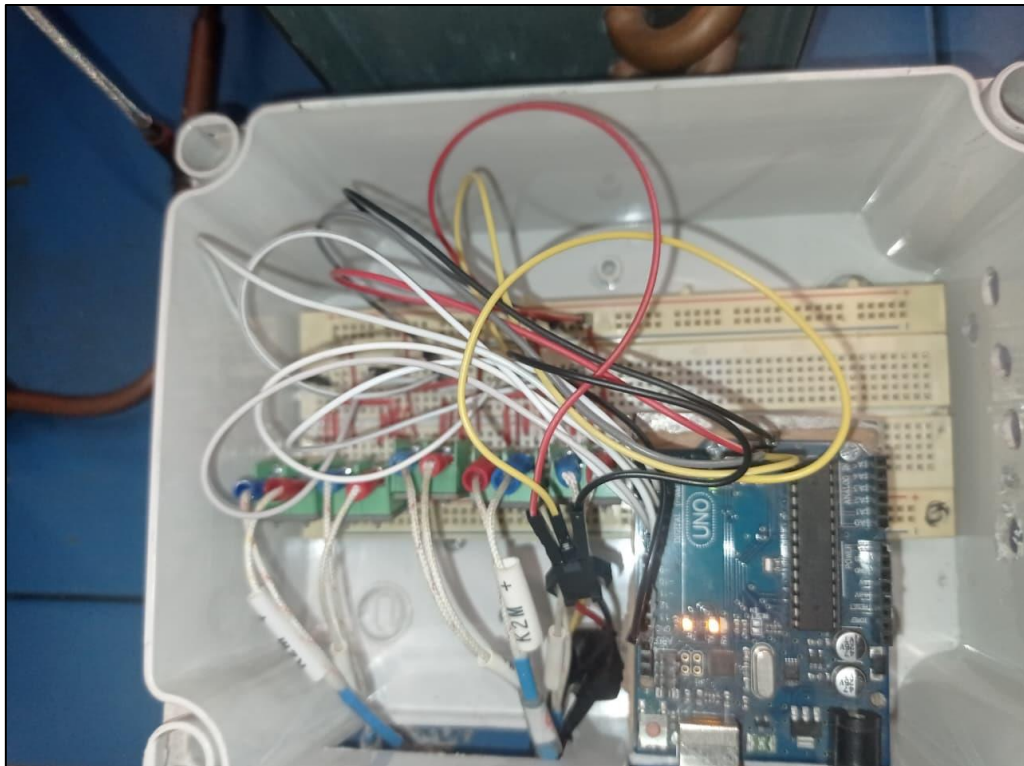
#### 1.4 Subsistema adquisición de datos

Registra y almacena los datos de operación del sistema. Conformado por:

Elementos	Función
<b>Caja</b>	Alberga la conexión del subsistema.
<b>Arduino uno</b>	Microcontrolador programable, registra los datos de los sensores.
<b>5 sensores Max6675</b>	Realiza la lectura de la termocupla y la entrega al Arduino.
<b>5 termocupla tipo k</b>	Captan la temperatura en los diferentes puntos en el sistema.
<b>Caudalímetro</b>	Ubicada en el retorno al tanque de alimento, registra el flujo de agua circulando.
<b>Protoboard</b>	Placa con orificios donde se instala el circuito.

**Figura 65**

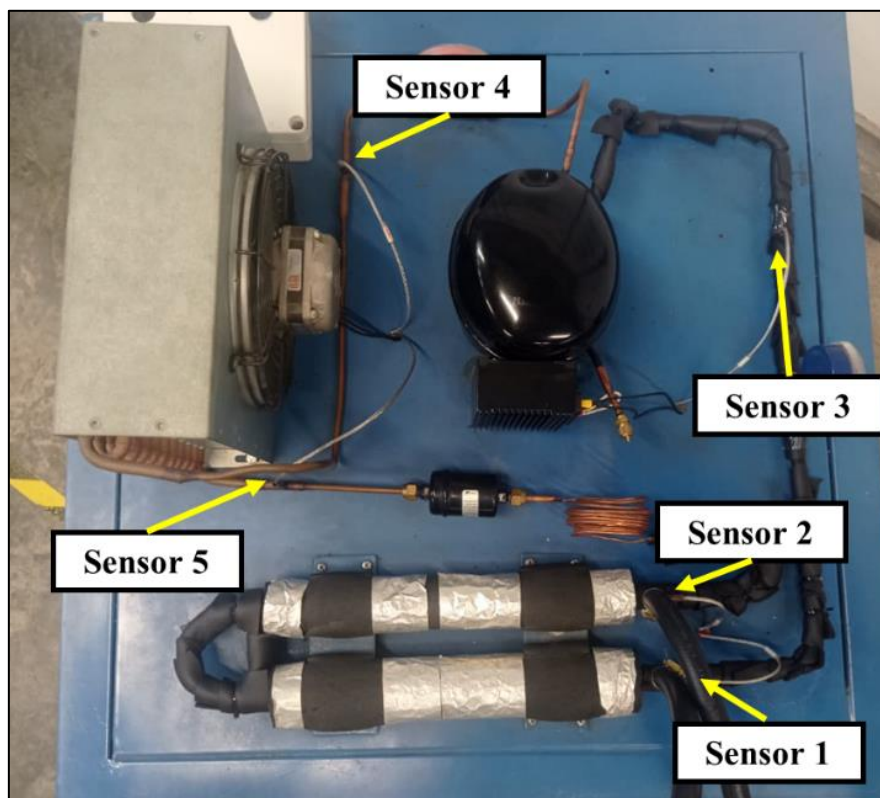
*Elementos subsistema adquisición de datos*



(a)



(b)



(c)

Figura 66

Esquema Conexión sistema adquisición de datos.

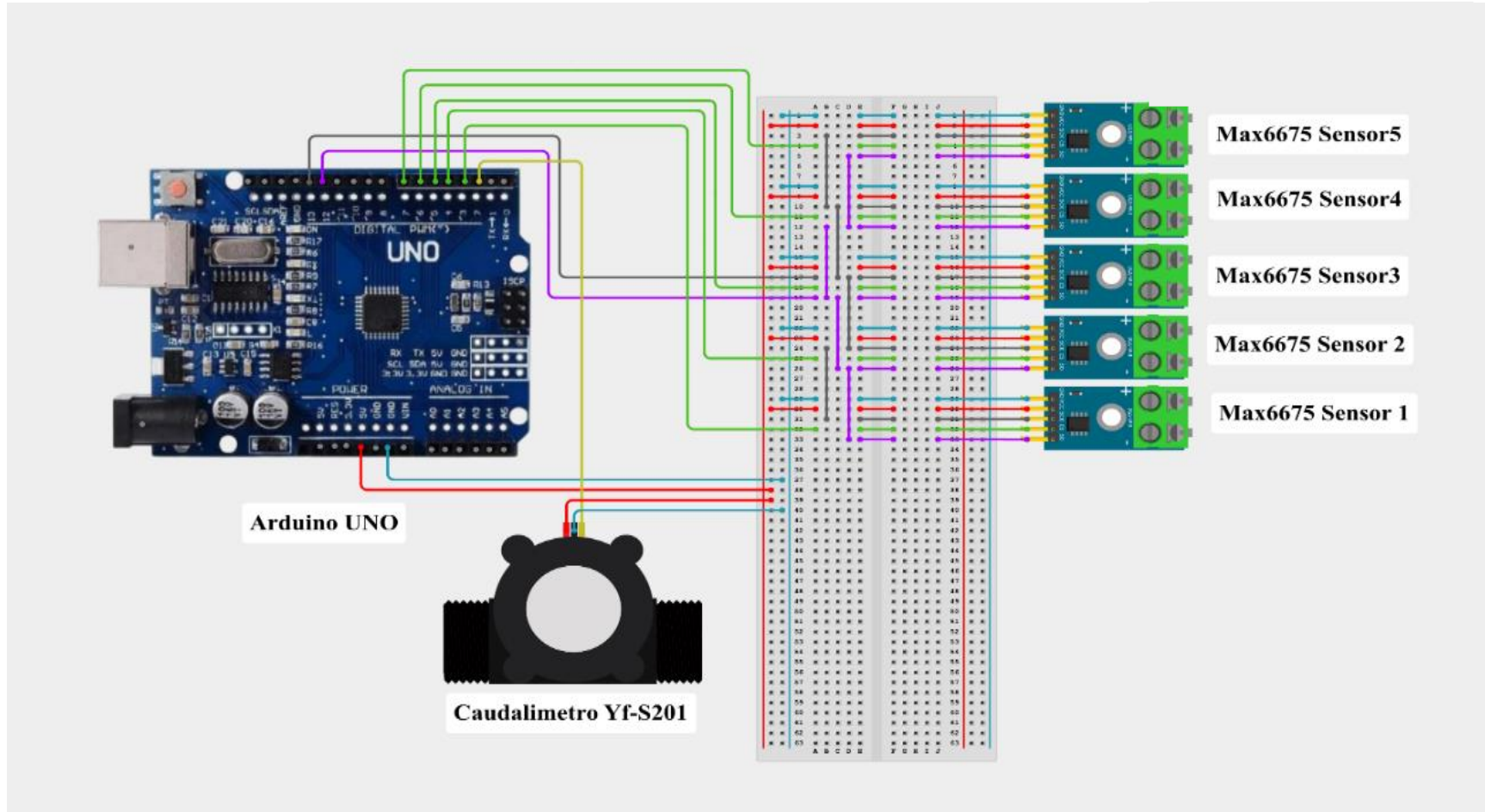
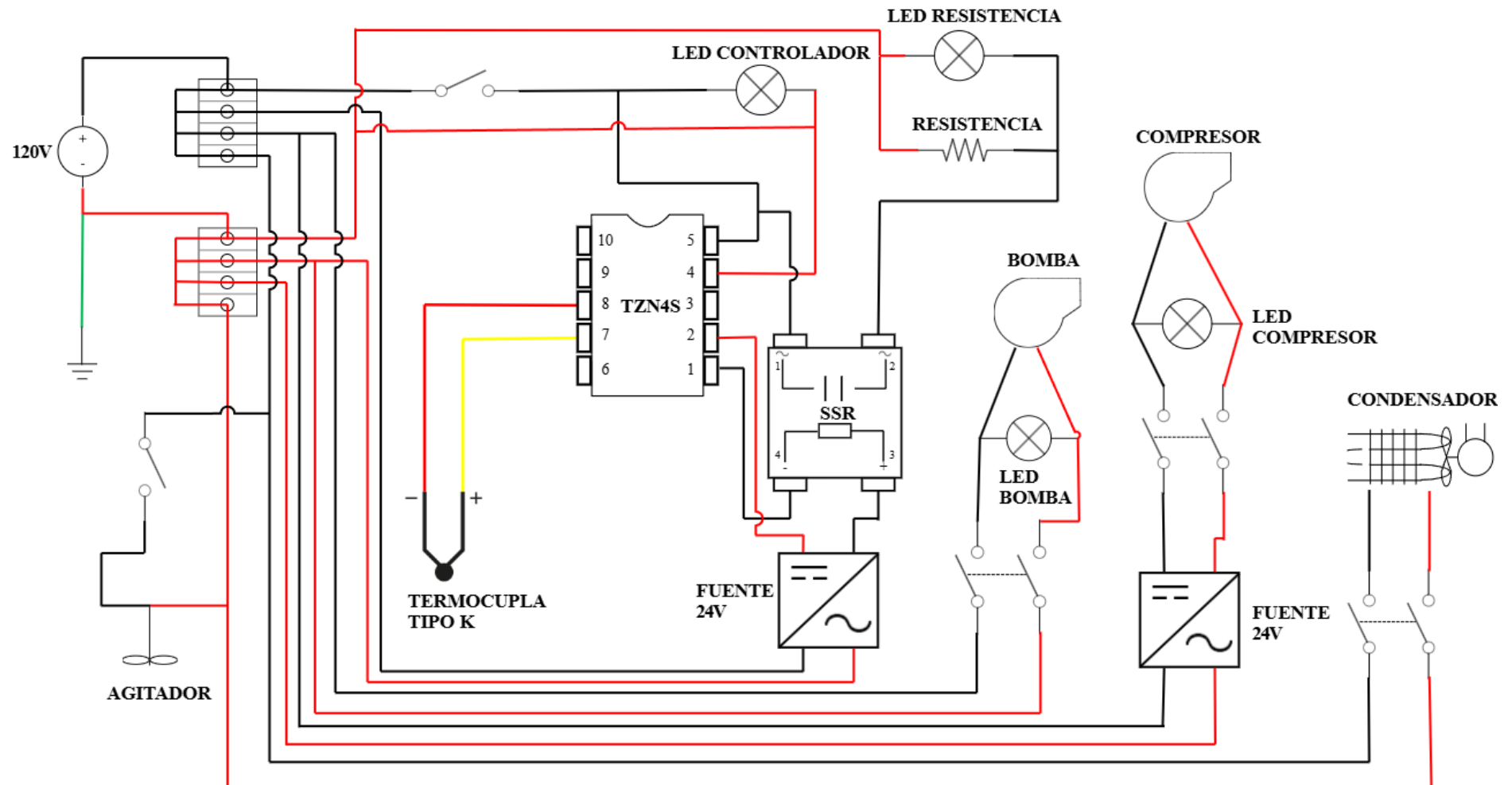


Figura 67

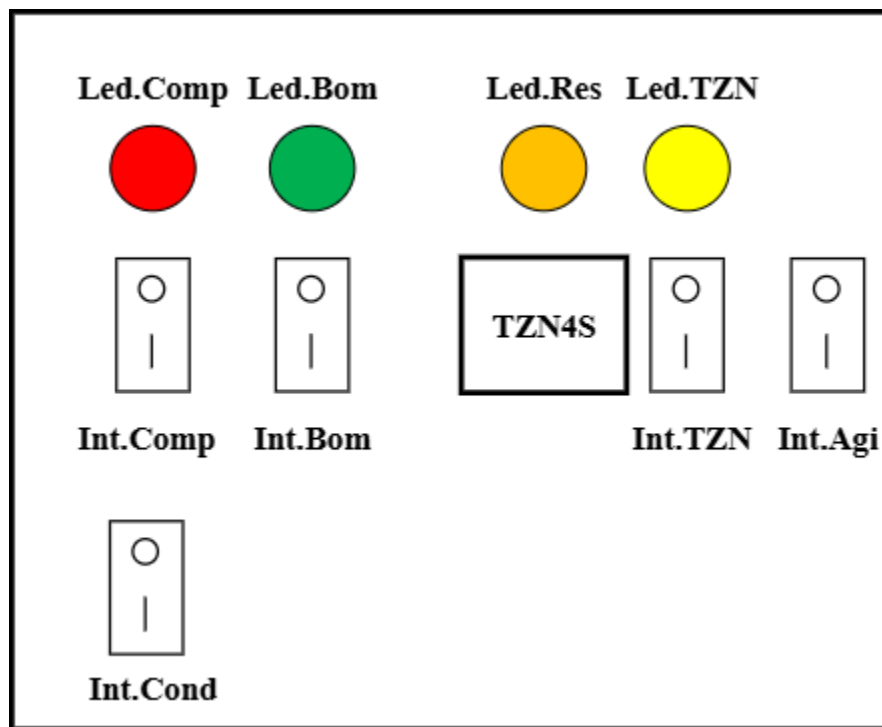
*Diagrama eléctrico del sistema*

## 2. Instrucciones de uso

En la Figura 68 se muestra el nombre asociado a cada interruptor para facilitar la descripción de las instrucciones de uso, a su vez en la Figura 69 se aprecia el esquema del banco de intercambiador de calor de tubos concéntricos.

**Figura 68**

*Esquema tablero de control*



### 2.1 Antes de la puesta en marcha

- Verifique que la válvula de bola y la válvula de drenaje se encuentren cerradas (Perpendicular con la línea).
- Verifique que el nivel de agua en el tanque cubra gran parte de la resistencia (el vástago no puede tener ocho (8) cm por fuera del agua o podría dañarse).

- Verifique que todos los interruptores se encuentren apagados (accionados hacia el símbolo “o”)

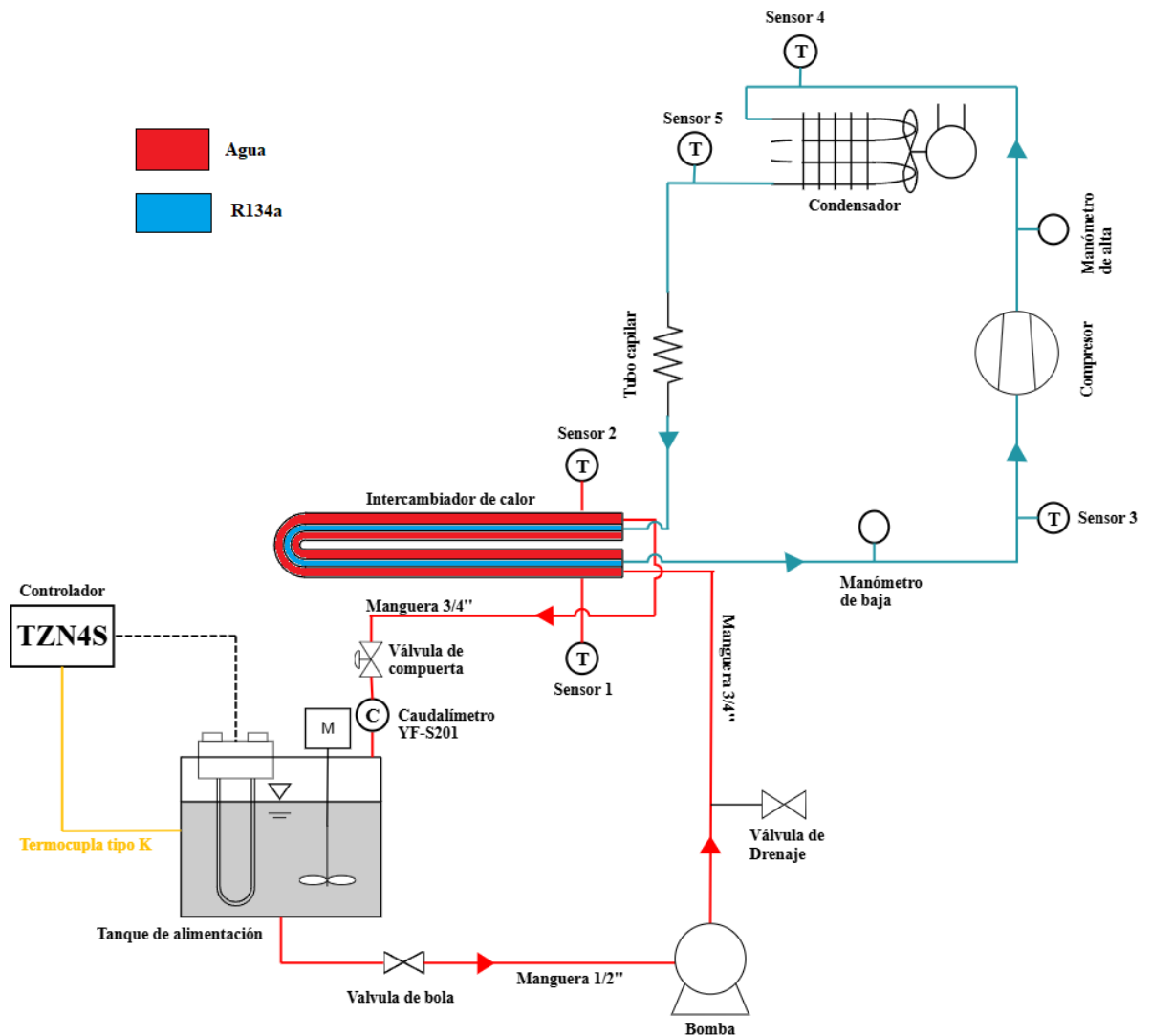
## 2.2 Puesta en marcha

1. Energizar el banco de pruebas conectando el cable del tablero de control.
2. Encender el controlador (Int.TZN) y el agitador (Int.Agi). Esperar hasta que alcance la temperatura deseada. (Temperatura en el controlador). Tener presente que el agitador no puede estar encendido durante toda la puesta por ello se recomienda no dejarlo encendido por tiempo mayores a 5 minutos.
3. Una vez alcanzada la temperatura deseada, abrir la válvula de bola y esperar 1 minuto a que la bomba se cebe. Agregar agua al tanque hasta el nivel descrito anteriormente.
4. Conectar el subsistema de adquisición de datos a la computadora he iniciar el registro de datos.
5. Encender la bomba (Int.Bom).
6. Esperar 10 minutos que la bomba alcance su régimen de trabajo, cuando alcanza este punto se determina que flujo de agua va a trabajar, abriendo o cerrando la válvula de compuerta hasta la condición deseada. Esto lo monitorea con el caudalímetro.
7. Encender el condensador (Int.Cond) y el compresor (Int.Comp).
8. Esperar un tiempo (alrededor de 20 minutos) a que se estabilice el sistema. Esto lo puede comprobar con el subsistema de adquisición de datos. Cuando alcanza este punto se realiza la toma de datos de forma manual si lo desea.
9. Al finalizar la toma de datos, se apaga el equipo empezando por la resistencia eléctrica (Int.TZN), luego el compresor (Int.Comp), a continuación, el condensador (Int.Cond) y por último la bomba (Int.Bomb).

10. Cerrar la válvula de bola en la salida del tanque. (Si desea drenar el tanque dejar abierta).
11. Abrir la válvula de drenaje para drenar el agua almacenada en la línea de la bomba.
12. Por último, des energizar el banco desconectando el cable del tablero de control del punto de toma.

**Figura 69**

*Esquema del banco de intercambiador de calor de tubos concéntricos*



### 3. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo común implica la limpieza y la prueba general del sistema. Por ello es importante tener presente las instrucciones de uso para un mejor desempeño y protección del sistema. Basándonos en ello se exponen los siguientes puntos.

1. Diariamente antes y durante la operación, comprobar que el nivel de agua en el tanque cubra casi al completo el vástago de la resistencia.
2. Diariamente antes y después de la operación, inspeccionar la diferente tubería en búsqueda de posibles fugas o grietas.
3. Diariamente antes de encender la bomba en el sistema, asegurarse de que esta cebada, abriendo la válvula de bola en la salida del tanque.
4. Diariamente, después de finalizar las pruebas, drenar el agua en la línea de la bomba.
5. Diariamente antes y después de la operación comprobar la instrumentación para detectar posibles cambios en el sistema.
6. Semanalmente cambiar el agua en el tanque y limpiarlo para evitar impurezas en el sistema de alimentación.
7. Cada semestre inspeccionar los voltajes y amperajes en el sistema.
8. Mensualmente desmontar y limpiar la bomba.
9. Semestralmente debe verificarse la conexión eléctrica para comprobar falsos contactos.

**Apéndice H. Código Arduino para la recolección de datos**

```
#include "max6675.h"
#include "SPI.h"

int thermoCLK = 13;
int thermoDO = 12;
int cs1 = 3;
int cs2 = 4;
int cs3 = 5;
int cs4 = 6;
int cs5 = 7;

// Sensor de flujo YF-S201
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2
float factor_conversion=7.5; //para convertir de frecuencia a caudal
float volumen=0;
long dt=0; //variación de tiempo por cada bucle
long t0=0; //millis() del bucle anterior

// Instancias de los sensores
MAX6675 sensor1(thermoCLK, cs1, thermoDO);
MAX6675 sensor2(thermoCLK, cs2, thermoDO);
MAX6675 sensor3(thermoCLK, cs3, thermoDO);
MAX6675 sensor4(thermoCLK, cs4, thermoDO);
MAX6675 sensor5(thermoCLK, cs5, thermoDO);

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{
  NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuecia()
{
  int frecuencia;
  NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
  interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
  delay(1000); //muestra de 1 segundo
  noInterrupts(); //Deshabilitamos las interrupciones
  frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
  return frecuencia;
}
```

```
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("CLEARDATA"); // Limpia datos -- Este comando borra solo
  los datos registrados
  Serial.println("CLEAR SHEET"); //Limpia hoja -- Este comando borra todos
  los datos de ActiveSheet (¡incluidas las etiquetas!).
  Serial.println("LABEL, fecha, hora, segundos, sensor1, sensor2, sensor3, sensor4,
  sensor5, caudal");
  Serial.println("RESETTIMER");
  randomSeed(analogRead(0));
  delay(500);

  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0, ContarPulsos, RISING); // (Interrupción
  0(Pin2), función, Flanco de subida)
  Serial.println ("Envie 'r' para restablecer el volumen a 0 Litros");
  t0=millis();

  // Configurar pines CS como salidas
  pinMode(cs1, OUTPUT);
  pinMode(cs2, OUTPUT);
  pinMode(cs3, OUTPUT);
  pinMode(cs4, OUTPUT);
  pinMode(cs5, OUTPUT);
  // Desactivar todos los sensores al inicio
  digitalWrite(cs1, HIGH);
  digitalWrite(cs2, HIGH);
  digitalWrite(cs3, HIGH);
  digitalWrite(cs4, HIGH);
  digitalWrite(cs5, HIGH);
}

void loop() {
  // Leer temperaturas con delay para estabilidad
  float temp1 = sensor1.readCelsius();
  delay(250);
  float temp2 = sensor2.readCelsius();
  delay(250);
  float temp3 = sensor3.readCelsius();
```

```
    delay(250);
    float temp4 = sensor4.readCelsius();
    delay(250);
    float temp5= sensor5.readCelsius();
    delay(250);

    if (Serial.available()) {
        if(Serial.read()=='r')volumen=0;//restablecemos el volumen si recibimos
'r'
    }
    float frecuencia=ObtenerFrecuecia(); //obtenemos la frecuencia de los
pulsos en Hz
    float caudal=frecuencia/factor_conversion; //calculamos el caudal en L/m
dt=millis()-t0; //calculamos la variación de tiempo
    t0=millis();
    volumen=volumen+(caudal/60)*(dt/1000); // volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)

    // Imprimir las lecturas de manera lineal para que el pythobn las pueda
leer
    Serial.print(temp1, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(temp2, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(temp3, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(temp4, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(temp5, 2); Serial.print(",");
    Serial.println(caudal, 2);

    delay(1000); // Esperar 1 segundo entre
lecturas
}
```

## Apéndice I. Instrucciones uso de la interfaz

### MANUAL DE USO DE LA INTERFAZ

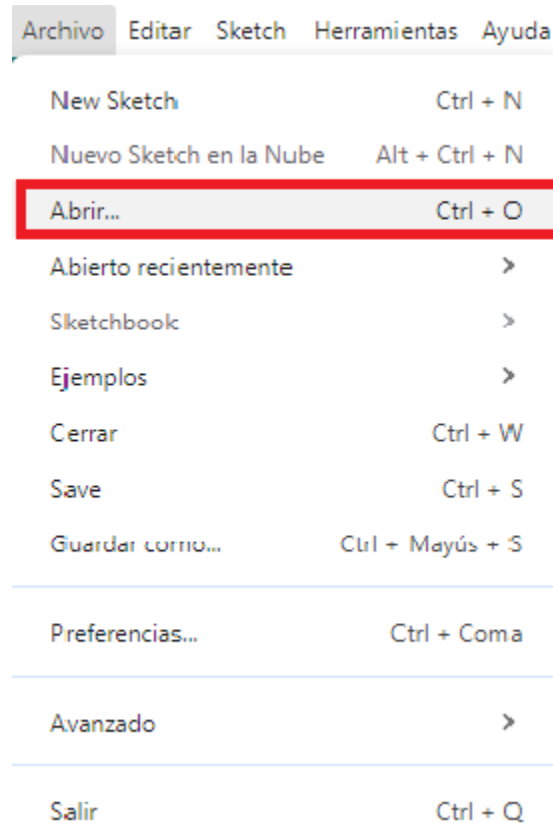
El presente manual tiene como propósito orientar al usuario en el **uso, configuración y operación de la interfaz desarrollada para el banco de pruebas de intercambiadores de calor de tubos concéntricos**. Este documento describe de manera detallada los pasos necesarios para establecer la comunicación entre el sistema de adquisición de datos basado en **Arduino** y la plataforma de programación en **Python**, empleando el entorno de desarrollo **Visual Studio Code**. Además, proporciona las instrucciones esenciales para la correcta identificación de los puertos de conexión, la carga del proyecto y la ejecución del código, garantizando así un funcionamiento confiable y seguro del sistema. Su lectura y aplicación permitirá al usuario comprender la estructura del software, optimizar la toma de datos experimentales y asegurar la adecuada interacción entre los componentes físicos y digitales del equipo.

#### 1. Abrir, cargar y visualizar datos del sketch en Arduino IDE

Para iniciar, se debe abrir el entorno de desarrollo Arduino IDE. Una vez en la aplicación, en la barra de menú superior se selecciona la pestaña “Archivo” y luego “abrir” (Figura 70 y Figura 71).

#### Figura 70



**Figura 71**

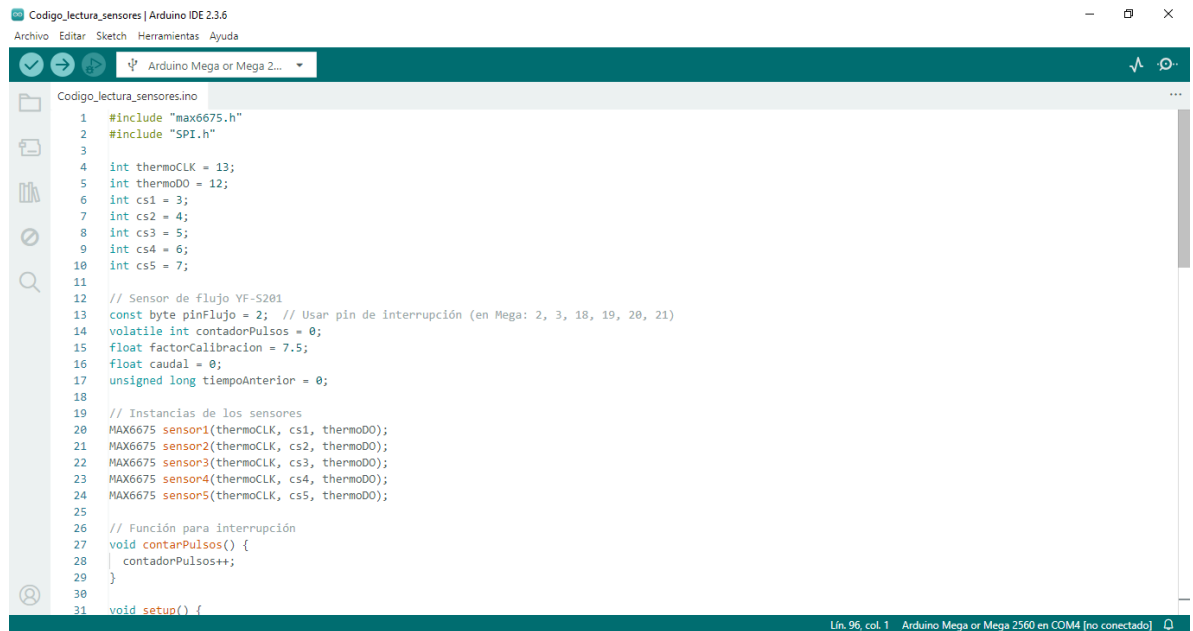
Diríjase a la carpeta de nombre “Proyecto intercambiadores de calor” subcarpeta “Código lectura de sensores” y selecciona el archivo correspondiente. Ver (Figura 72)

**Figura 72**

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Codigo_lectura_sensores	2/10/2025 10:46 a. m.	Archivo INO	2 KB

Una vez abierto el código en el Arduino IDE (Figura 73), conecte la placa y verifique que esta se encuentre seleccionada dentro de la aplicación. Ver (Figura 74)

Figura 73



```
Codigo_lectura_sensores.ino
1  #include "max6675.h"
2  #include "SPI.h"
3
4  int thermoCLK = 13;
5  int thermoDO = 12;
6  int cs1 = 3;
7  int cs2 = 4;
8  int cs3 = 5;
9  int cs4 = 6;
10 int cs5 = 7;
11
12 // Sensor de flujo YF-S201
13 const byte pinFlujo = 2; // Usar pin de interrupción (en Mega: 2, 3, 18, 19, 20, 21)
14 volatile int contadorPulsos = 0;
15 float factorCalibracion = 7.5;
16 float caudal = 0;
17 unsigned long tiempoAnterior = 0;
18
19 // Instancias de los sensores
20 MAX6675 sensor1(thermoCLK, cs1, thermoDO);
21 MAX6675 sensor2(thermoCLK, cs2, thermoDO);
22 MAX6675 sensor3(thermoCLK, cs3, thermoDO);
23 MAX6675 sensor4(thermoCLK, cs4, thermoDO);
24 MAX6675 sensor5(thermoCLK, cs5, thermoDO);
25
26 // Función para interrupción
27 void contarPulsos() {
28   contadorPulsos++;
29 }
30
31 void setup() {
```

Figura 74



Luego, verifique que las librerías que se encuentran presentes en el código estén instaladas dentro del Arduino. Ver (Figura 75)

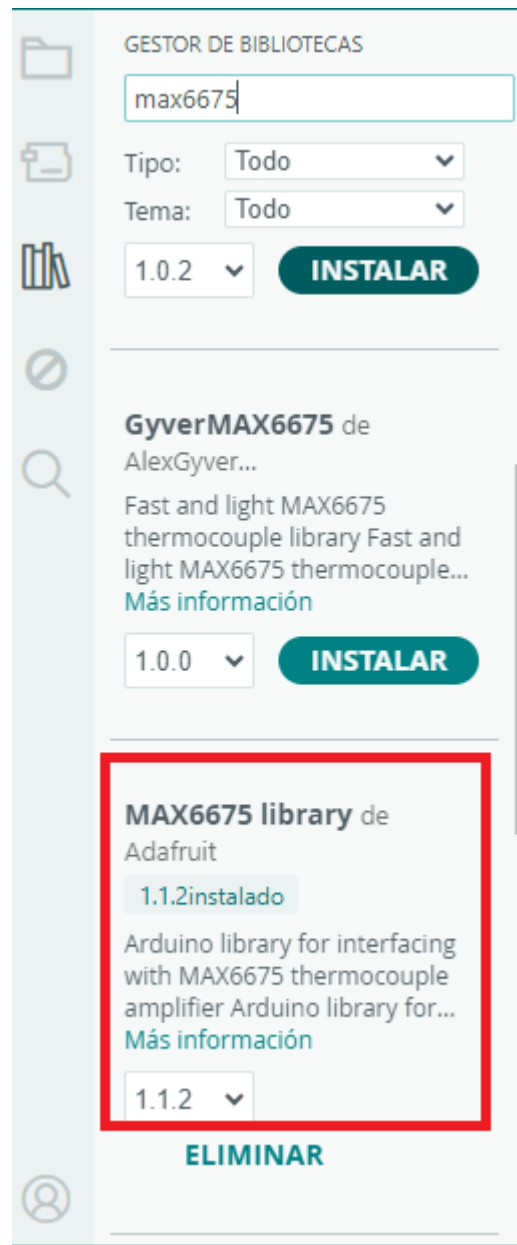
Figura 75

```
Codigo_lectura_sensores.ino
1  #include "max6675.h"
2  #include "SPI.h"
```

Para ello, diríjase a la biblioteca de Arduino panel lateral izquierdo y coloque el nombre de la librería tal cual como se encuentra en el código. A continuación, busque la

librería correspondiente al usuario Adafruit y verifique si esta se encuentra instalada como en la Figura 76. Repita este mismo procedimiento para la siguiente librería.

**Figura 76**



Luego de haber verificado la instalación de las librerías cargue el código en la placa presionado el botón “Cargar” (Figura 77). Finalmente acceda al icono de la lupa (Figura 78) ubicado en la parte superior derecha de la aplicación y verifique que las lecturas de los

sensores y del flujómetro se visualicen de forma coherente con la condición establecida en el banco de pruebas.

**Figura 77**



**Figura 78**



## 2. Configuración del puerto de comunicación

Para establecer la conexión entre la placa de Arduino IDE y el programa en Python, es necesario identificar y configurar correctamente el puerto de comunicación.

En la aplicación de Arduino IDE diríjase al menú superior y seleccione la pestaña “Herramientas” seguido de la opción “Puerto” (Figura 80 y Figura 80).

Figura 79

```

sketch_may22a.ino
1  #include "max6675.h"
2  #include "SPI.h"
3
4  // Pines MAX6675
5  int thermoCLK = 52;
6  int thermoDO = 50;
7  int cs1 = 2;
8  int cs2 = 3;
9  int cs3 = 4;
10 int cs4 = 5;
11 int cs5 = 6;
12
13 // Sensor de flujo YF-S201
14 const byte pinFlujo = 21; // Usar pin de interrupción (en Mega: 2, 3, 18, 19, 20, 21)
15 volatile int contadorPulsos = 0;
16 float factorCalibracion = 7.5;
17 float caudal = 0;
18 unsigned long tiempoAnterior = 0;
19
20 MAX6675 sensor1(thermoCLK, cs1, thermoDO);
21 MAX6675 sensor2(thermoCLK, cs2, thermoDO);
22 MAX6675 sensor3(thermoCLK, cs3, thermoDO);
23 MAX6675 sensor4(thermoCLK, cs4, thermoDO);
24 MAX6675 sensor5(thermoCLK, cs5, thermoDO);
25
26 // Función para interrupción
27 void contarPulsos() {
28   contadorPulsos++;

```

Figura 80

```

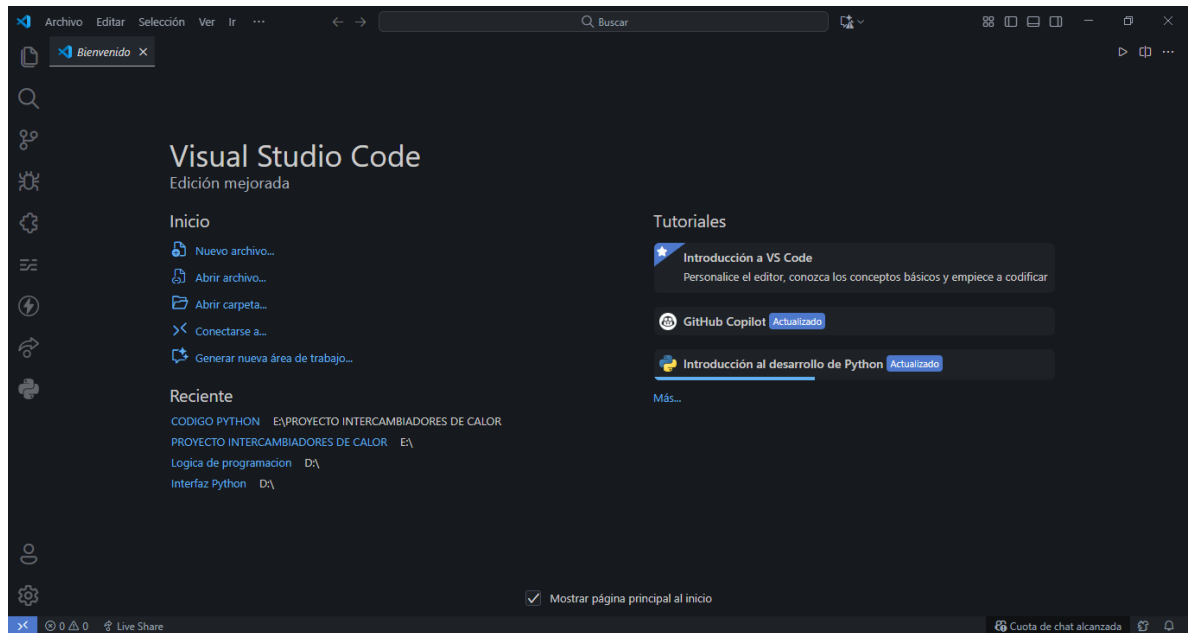
sketch_may22a
1  #include "max6675.h"
2  #include "SPI.h"
3
4  // Pines MAX6675
5  int thermoCLK = 52;
6  int thermoDO = 50;
7  int cs1 = 2;
8  int cs2 = 3;
9  int cs3 = 4;
10 int cs4 = 5;
11 int cs5 = 6;
12
13 // Sensor de flujo YF-S201
14 const byte pinFlujo = 21; // Usar pin de interrupción (en Mega: 2, 3, 18, 19, 20, 21)
15 volatile int contadorPulsos = 0;
16 float factorCalibracion = 7.5;
17 float caudal = 0;
18 unsigned long tiempoAnterior = 0;
19
20 MAX6675 sensor1(thermoCLK, cs1, thermoDO);
21 MAX6675 sensor2(thermoCLK, cs2, thermoDO);
22 MAX6675 sensor3(thermoCLK, cs3, thermoDO);
23 MAX6675 sensor4(thermoCLK, cs4, thermoDO);
24 MAX6675 sensor5(thermoCLK, cs5, thermoDO);
25
26 // Función para interrupción
27 void contarPulsos() {
28   contadorPulsos++;

```

Allí se listarán los puertos disponibles, seleccione el puerto donde se encuentra conectado el Arduino (ejemplo: “COM4” en Windows o */dev/ttyUSB0* en Linux).

Del mismo modo abra la aplicación Visual Studio Code y seleccione la opción “Abrir carpeta”. (Figura 82 y Figura 82 ).

**Figura 81**



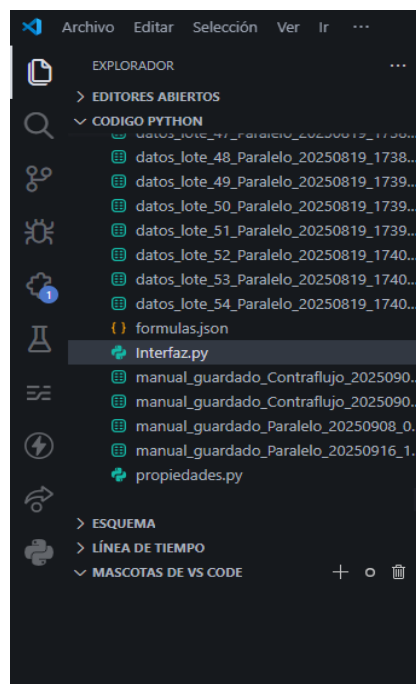
**Figura 82**



- 
- 
- 

Nuevamente, daremos click en la carpeta “Proyecto Intercambiadores de calor” subcarpeta “Código Python “. El entorno cargará de manera automática todos los archivos contenidos en dicha carpeta, los cuales se visualizarán en el panel lateral izquierdo. Seleccionaremos el archivo “Interfaz.py” (Figura 83).

**Figura 83**

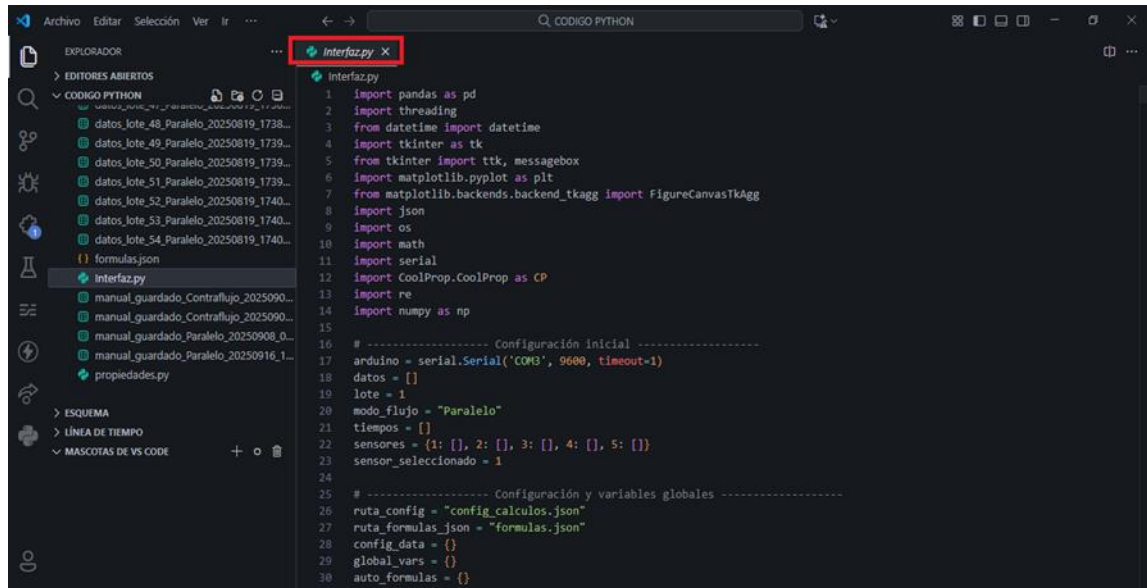


•

•

Posteriormente, se abrirá una ventana con el código en el panel derecho y dentro del código busque la sección denominada “Configuración Inicial” y edite la línea en caso de que el puerto especificado sea distinto al puerto descrito en el Arduino ( Figura 85 y Figura 85).

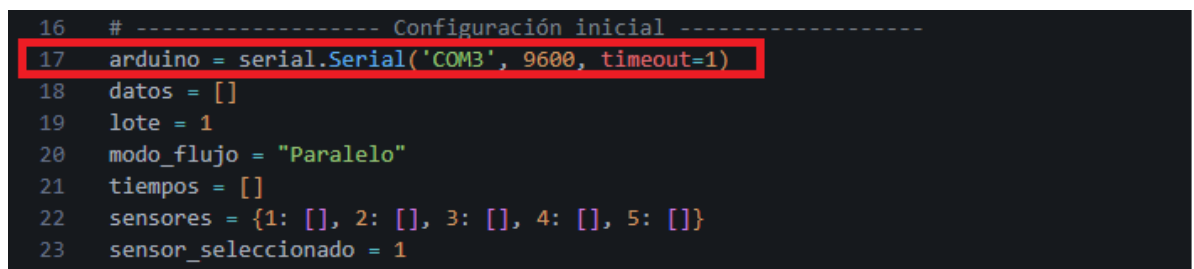
Figura 84



The screenshot shows a Python IDE window titled 'interfaz.py'. The code includes imports for pandas, threading, datetime, tkinter, matplotlib, json, os, math, serial, re, and numpy. It defines initial configuration for an Arduino serial connection and global variables for file paths and data structures.

```
1 import pandas as pd
2 import threading
3 from datetime import datetime
4 import tkinter as tk
5 from tkinter import ttk, messagebox
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
8 import json
9 import os
10 import math
11 import serial
12 import CoolProp.CoolProp as CP
13 import re
14 import numpy as np
15
16 # ----- Configuración inicial -----
17 arduino = serial.Serial('COM3', 9600, timeout=1)
18 datos = []
19 lote = 1
20 modo_flujo = "Paralelo"
21 tiempos = []
22 sensores = {1: [], 2: [], 3: [], 4: [], 5: []}
23 sensor_seleccionado = 1
24
25 # ----- Configuración y variables globales -----
26 ruta_config = "config_calculos.json"
27 ruta_formulas_json = "formulas.json"
28 config_data = {}
29 global_vars = {}
30 auto_formulas = {}
```

Figura 85

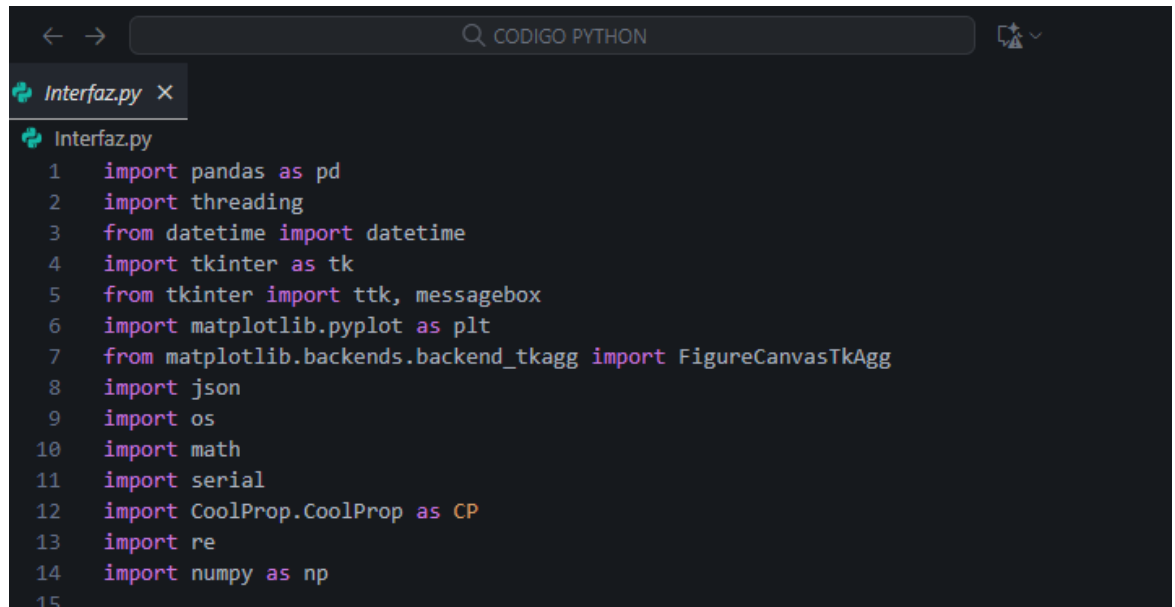


This is a close-up of line 17 from the code in Figure 84, which is highlighted with a red box. It shows the initialization of the Arduino serial connection.

```
17 arduino = serial.Serial('COM3', 9600, timeout=1)
```

### 3. Instalación y o verificación de librerías

Para garantizar el correcto funcionamiento de la interfaz es indispensable contar con la instalación y/o verificación de las librerías presentes en la Figura 86.

**Figura 86**

```
← → Q CODIGO PYTHON
Interfaz.py ×
Interfaz.py
1 import pandas as pd
2 import threading
3 from datetime import datetime
4 import tkinter as tk
5 from tkinter import ttk, messagebox
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
8 import json
9 import os
10 import math
11 import serial
12 import CoolProp.CoolProp as CP
13 import re
14 import numpy as np
15
```

Para ello, diríjase a la terminal integrada en Visual Studio Code utilizando la combinación de teclas **Ctrl+ñ**. Esto hará que se habrá un recuadro en la parte inferior del entorno. En la terminal deberá escribir el comando “**pip list**” seguido de la tecla enter. (Figura 87).

**Figura 87**

```
PROBLEMAS SALIDA CONSOLA DE DEPURACIÓN TERMINAL PUERTOS MONITOR SERIE powershell + v | | | | |
PS E:\PROYECTO INTERCAMBIADORES DE CALOR\CODIGO PYTHON> pip list
Lín. 22, col. 47 Espacios: 4 UTF-8 CRLF () Python Cuota de chat alcanzada Prettier
```

Con este comando, la terminal mostrara un listado con las librerías instaladas (Figura 88). Sino aparece instalada alguna de las librerías de la Figura 86 deberá escribir el **comando** `pip install <nombre_de_la_libreria>` y oprimir la tecla enter. Esto hará que inicie el proceso de instalación de la librería.

**Figura 88**

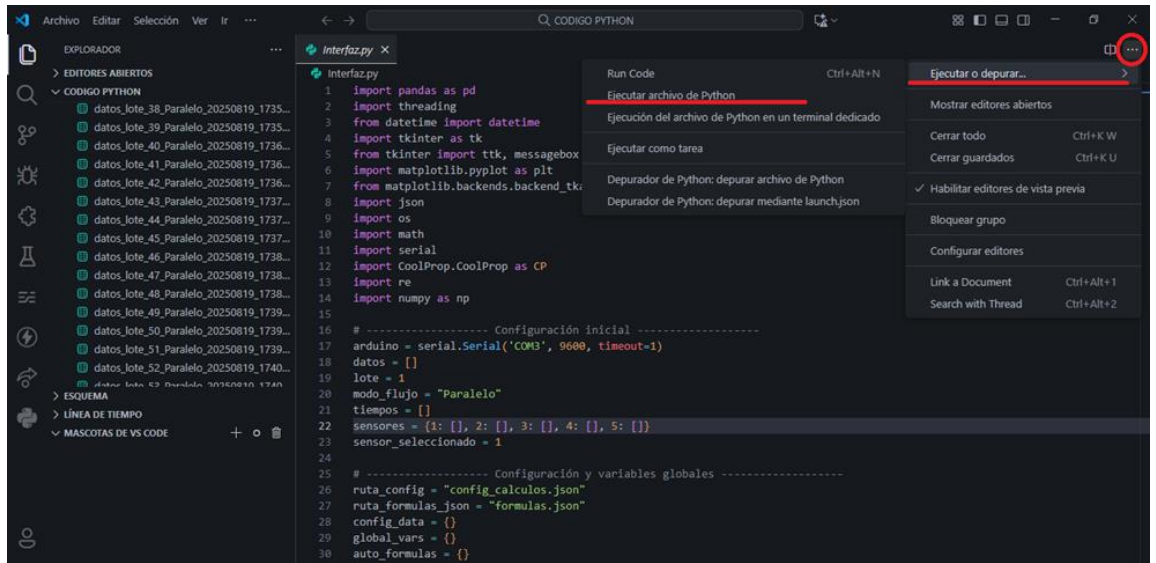


```
PS E:\PROYECTO INTERCAMBIADORES DE CALOR\CODIGO PYTHON> pip list
Package            Version
-----
asttokens          3.0.0
colorama           0.4.6
comm              0.2.2
contourpy         1.3.2
coolprop          6.8.0
cycler            0.12.1
debugpy           1.8.14
decorator         5.2.1
```

#### 4. Ejecución del programa en Python

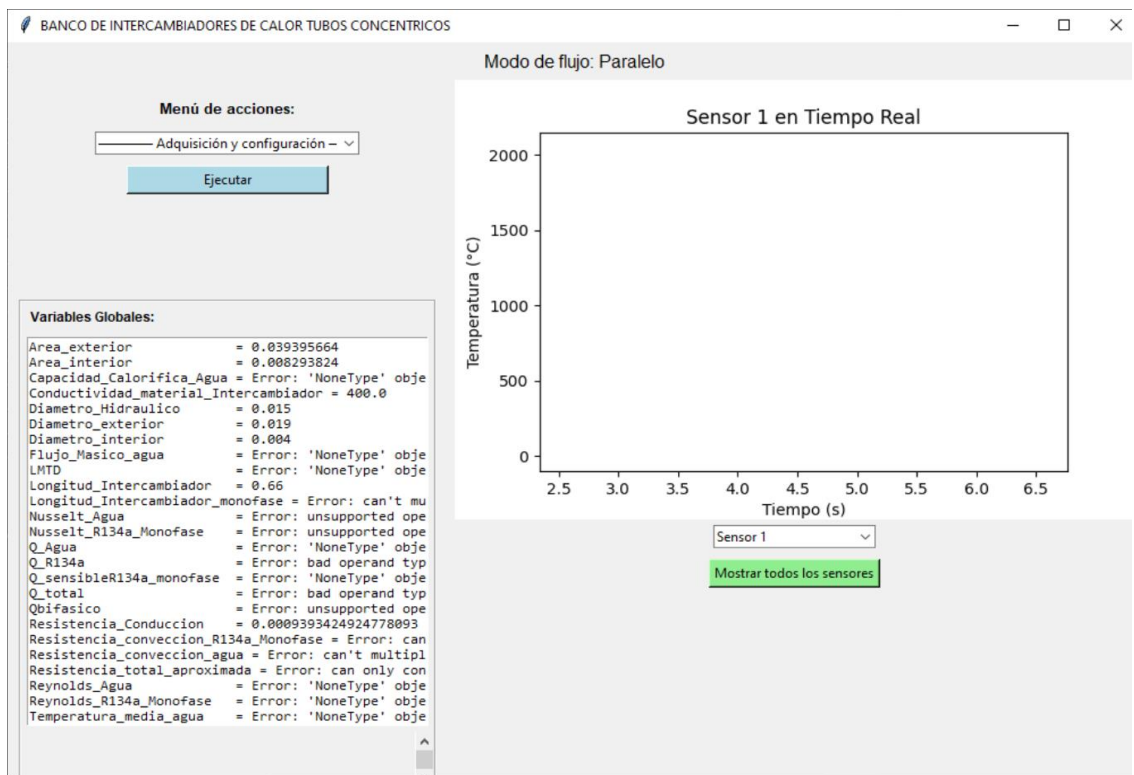
Una vez configurado el puerto de comunicación y verificada la instalación de las librerías necesarias, se procede a ejecutar el código de la interfaz. Seleccione la opción “Run Python File” o (ejecutar archivo Python), ubicada en la parte superior derecha del editor (Figura 89). Alternativamente también puede presionar la combinación de teclas **Ctrl+F5**.

**Figura 89**



El entorno abrirá una ventana correspondiente a la interfaz desarrollada en Tkinter (Figura 90)

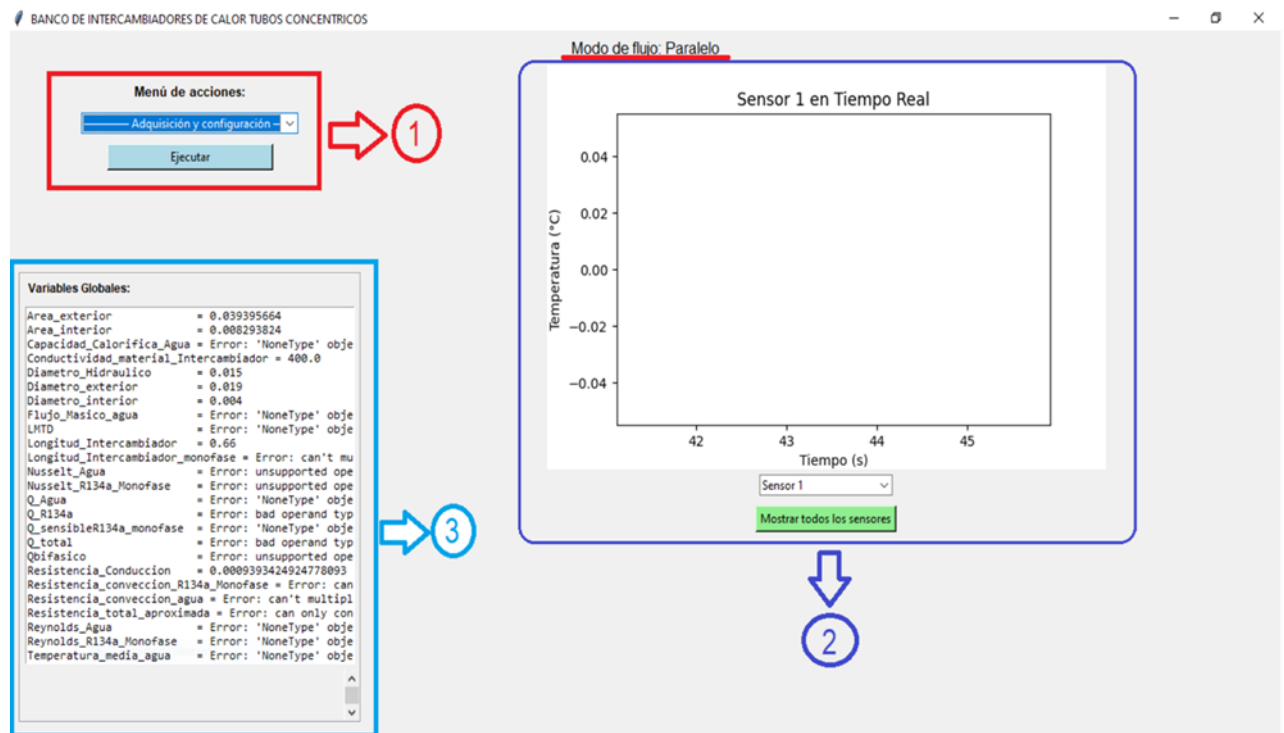
Figura 90



## 5. Descripción del panel de control de la interfaz.

En la parte lateral izquierda se ubica el **menú de acciones** (1), compuesto por un listado desplegable que permite seleccionar la operación deseada. Este se complementa con el botón “Ejecutar”, encargado de poner en marcha la acción seleccionada. (Ver Figura 91 )

**Figura 91**



En el panel central (2) se visualiza el **gráfico en tiempo real** correspondiente a la temperatura registrada por el sensor activo. Este gráfico se actualiza dinámicamente conforme se reciben los datos desde la placa de Arduino.

Adicionalmente, la interfaz dispone del botón “**Mostrar todos los sensores**”, que habilita la visualización simultánea de las curvas de temperatura de todos los sensores conectados, facilitando el análisis comparativo del comportamiento térmico en las distintas posiciones del banco de pruebas.

En la esquina inferior izquierda, se encuentra el baúl de variables globales (3) donde se almacenan todos los datos que se vayan guardando a medida que cada acción se ejecute.

## 6. Descripción de la Secuencia de Operación en el Menú de Acciones

La secuencia de operación que el usuario debe seguir para garantizar el correcto funcionamiento de la interfaz y la obtención de los datos, será la siguiente:

### 6.1 Seleccionar el modo de flujo

Esta selección se realiza a través del menú desplegable en la opción “Modo de flujo” y posteriormente presionando el botón “Ejecutar”, el sistema efectuará automáticamente el cambio entre los dos modos disponibles del banco de prueba: paralelo y contraflujo. Una vez realizados estos pasos, el modo de flujo seleccionado se visualizará en la ventana principal de la interfaz. (Ver Figura 92 y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Figura 92

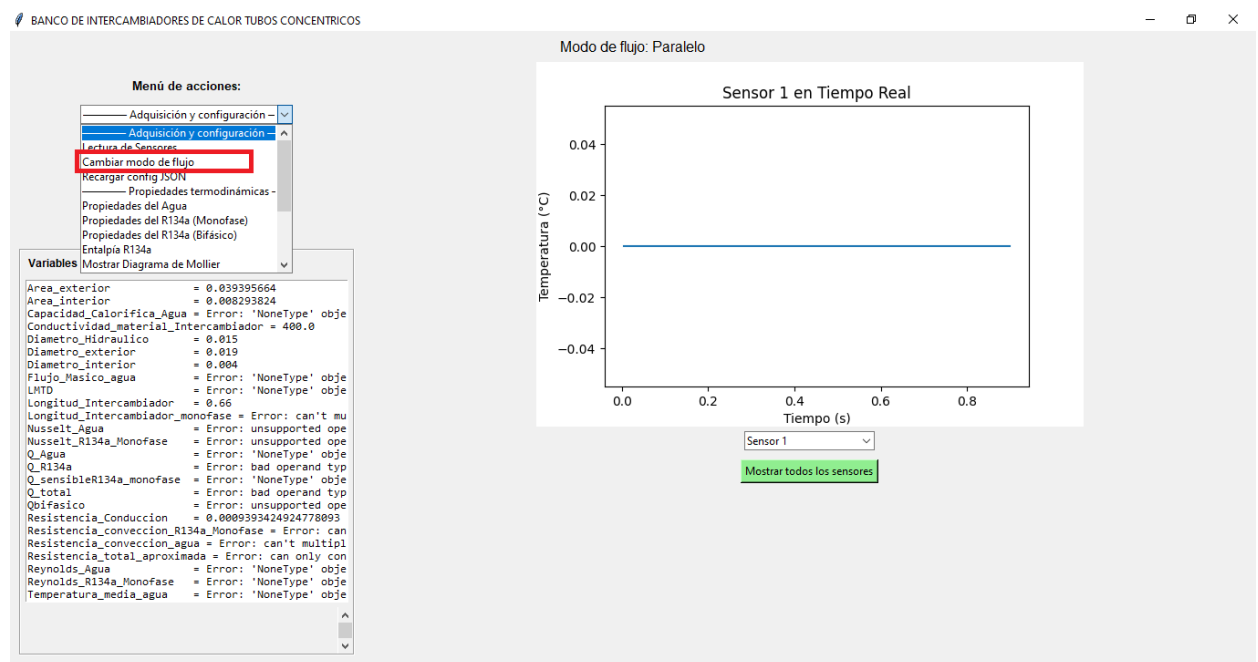
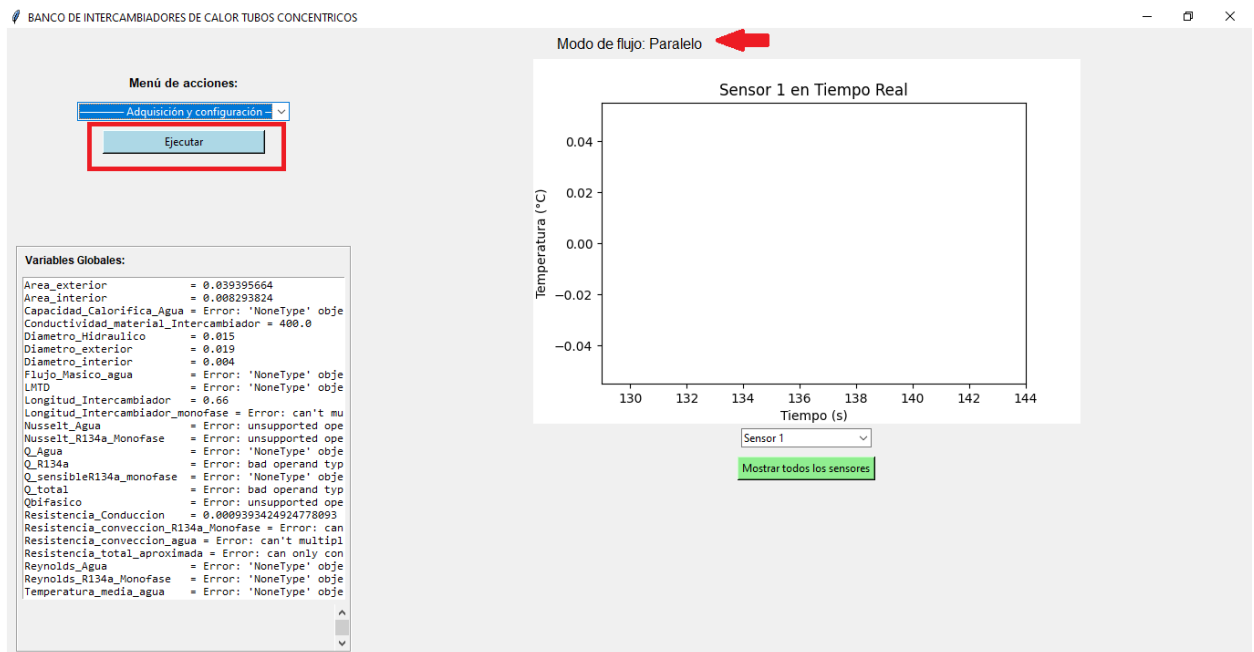
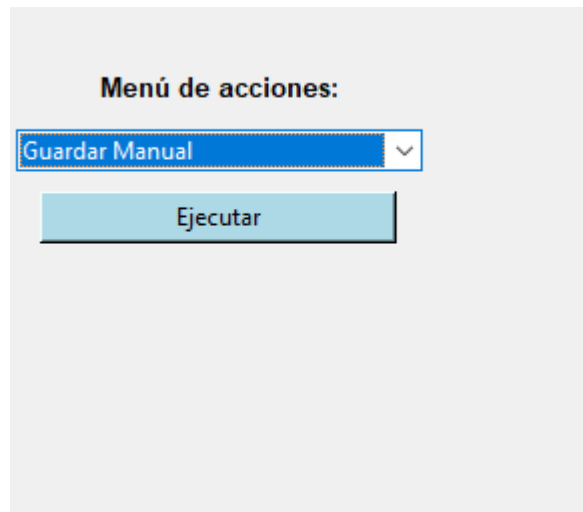


Figura 93







## 6.2 Registro y Captura de datos

En este paso, se recomienda esperar aproximadamente un minuto con el fin de garantizar una cantidad adecuada de muestras. Transcurrido este tiempo, se debe acceder al menú desplegable y seleccionar la opción “Guardar manual”, luego presionar el botón “Ejecutar”. (ver Figura 94)

**Figura 94**

Realizado este paso la interfaz creará un archivo Excel. El archivo tendrá como nombre `manual_guardado_<modo de flujo>` (Figura 95). Cada vez que se ejecute dicha acción en la interfaz, esta creará un documento nuevo dentro de la carpeta “Proyecto Intercambiadores de Calor” sub carpeta “Código Python “.

**Figura 95**

 manual_guardado_Paralelo_20250916_17...	16/09/2025 5:06 p. m.	Hoja de cálculo d...	8 KB
 manual_guardado_Contraflujo_20250909...	9/09/2025 12:28 p. m.	Hoja de cálculo d...	10 KB
 manual_guardado_Contraflujo_20250908...	8/09/2025 10:13 a. m.	Hoja de cálculo d...	37 KB
 manual_guardado_Paralelo_20250908_06...	8/09/2025 6:36 a. m.	Hoja de cálculo d...	6 KB

### 6.3 Contenido del documento Excel

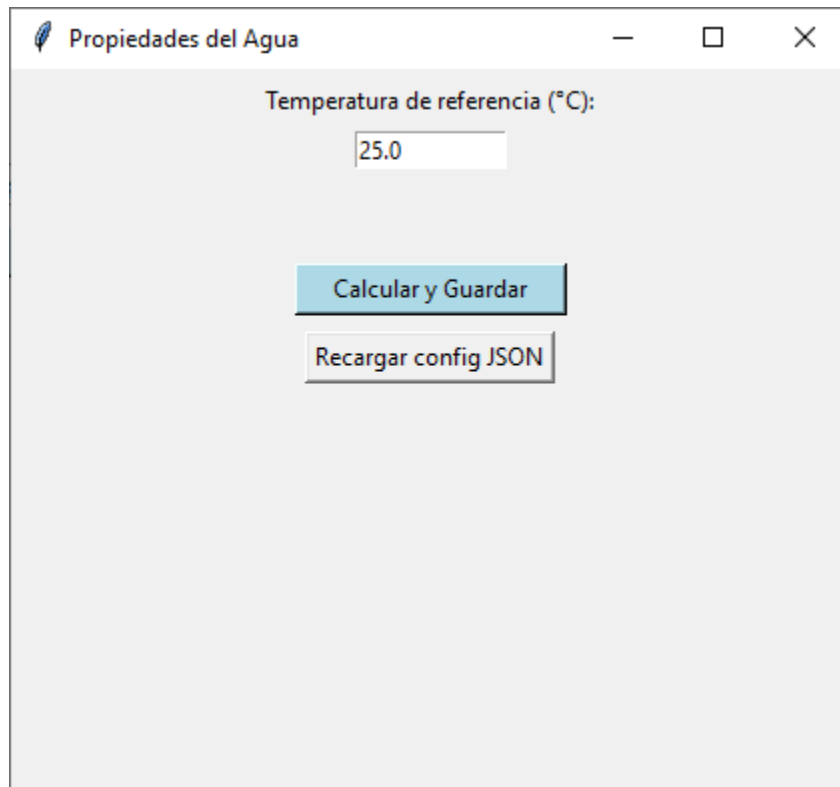
En el documento de Excel se registrará la fecha, hora y la lectura de cada uno de los sensores y los valores obtenidos del flujómetro. Se recomienda al usuario calcular un valor promedio en función de la cantidad de muestras tomadas, antes de ingresar los datos en la interfaz. (ver Figura 96)

Figura 96

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	FechaHora	Sensor1 (°C)	Sensor2 (°C)	Sensor3 (°C)	Sensor4 (°C)	Sensor5 (°C)	Flujo (L/min)														
2	2025-07-0 00:00	36,25	44,5	30,25	39,25	31,75	0														
3	2025-07-0 01:00	35,75	45	30,5	39,5	31,75	3,73														
4	2025-07-0 02:00	36,5	44,25	30	39,25	31,5	3,73														
5	2025-07-0 03:00	35,75	45	30	39,5	31,75	3,73														
6	2025-07-0 04:00	36	44,25	30,25	39,5	31,5	3,73														
7	2025-07-0 05:00	36,5	45	30	39,5	31,25	3,73														
8	2025-07-0 06:00	36,75	45,25	30	39	31,5	3,73														
9	2025-07-0 07:00	36,5	44,25	30	39,75	31,75	3,73														
10	2025-07-0 08:00	36,5	44,75	30,5	39,5	31,25	3,73														
11	2025-07-0 09:00	36,75	44,75	30,25	39,25	31,75	3,73														
12	2025-07-0 10:00	36,25	44,5	30,5	39,5	31,75	3,73														
13	2025-07-0 11:00	36,5	44,75	30,25	39,25	31,25	3,73														
14	2025-07-0 12:00	36,5	45	30,25	39,25	31,5	3,73														
15	2025-07-0 13:00	36,5	45,25	30,25	39,5	31,25	3,73														
16	2025-07-0 14:00	36,25	45	30,25	39,5	31,75	3,73														
17	2025-07-0 15:00	36,5	44,75	30,5	39,75	31,75	3,73														
18	2025-07-0 16:00	36,75	45	30,25	39,75	31,75	3,73														
19	2025-07-0 17:00	36,25	45	30,25	39,5	31,75	3,87														
20	2025-07-0 18:00	36,5	44,5	30,25	39,5	32	3,73														
21	2025-07-0 19:00	35,5	45,25	30,25	39,75	32	3,73														
22																					
23		36,3375	44,8	30,2375	39,4625	31,625	3,737368421														
24																					
25																					
26																					
27																					

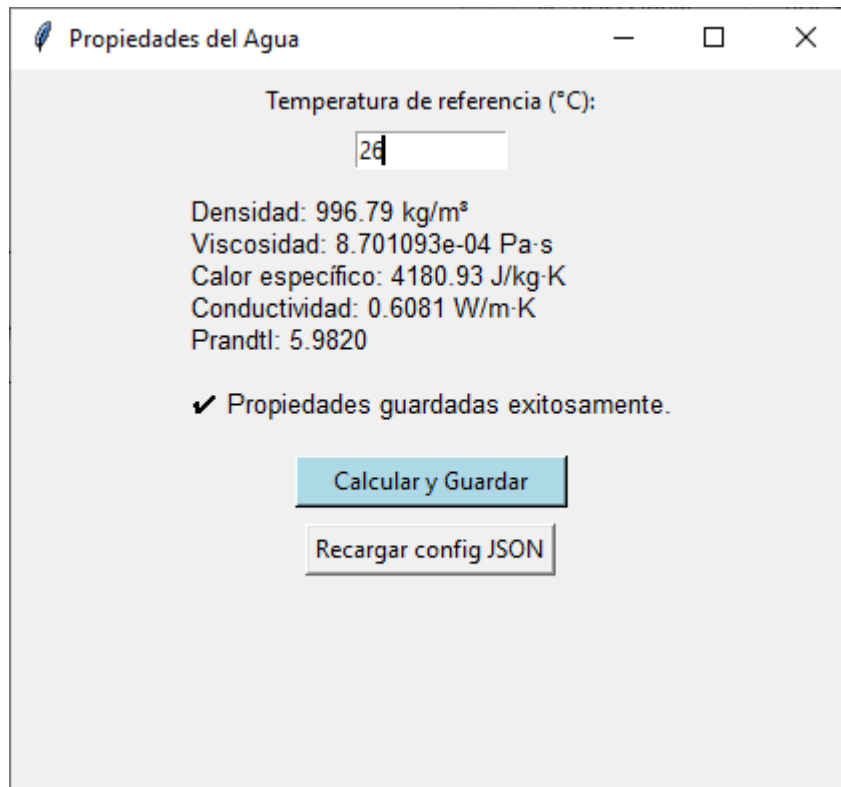
#### 6.4 Ingreso de temperatura de referencia del agua

Luego de haber realizado el paso anterior, volvemos a la interfaz para ingresar la temperatura de referencia del agua, para ello debemos ir al menú y seleccionar la opción “Propiedades del Agua “. Al elegir esta opción se abrirá una ventana como en la Figura 97.

**Figura 97**

The image shows a software window titled "Propiedades del Agua". Inside the window, there is a label "Temperatura de referencia (°C):" followed by a text input field containing the value "25.0". Below the input field, there are two buttons: "Calcular y Guardar" (highlighted in blue) and "Recargar config JSON".

En esta ventana se deberá ingresar en el campo de texto superior la temperatura de referencia, el cual presenta por defecto un valor inicial de 25°C que puede ser modificado manualmente de acuerdo a las condiciones del experimento. Una vez definido este parámetro, se procede a presionar el botón “Calcular y Guardar”. Automáticamente el sistema le mostrara las propiedades del agua a la temperatura especificada junto con un mensaje de guardado como en la Figura 98.

**Figura 98**

Este mensaje indica que los cálculos se han almacenado en un diccionario global que tiene como nombre “Global\_vars “y se encuentra dentro del código (Figura 99). En caso de que se requiera modificar el valor de entrada o que se haya editado alguna ecuación previamente. Se utilizará el botón “Recargar config JSON” el cual permite reconocer las modificaciones realizadas sin necesidad de reiniciar el programa.

**Figura 99**

```
# ----- Configuración y variables globales -----  
ruta_config = "config_calculos.json"  
ruta_formulas_json = "formulas.json"  
config_data = {}  
global_vars = {}  
auto_formulas = {}
```

## 6.5 Ingreso de estados del R134a

Luego, se debe volver al menú de opciones y seleccionar “Entalpía del R134a” la interfaz despliega una ventana emergente destinada al cálculo de las propiedades termodinámicas para cada uno de los estados presentes en ciclo de refrigeración. (ver Figura 100).

**Figura 100**

Entalpía R134a

**Ingrese los datos para 4 puntos**

*⚠ Solo el Punto 4 permite cálculo Isoentálpico*

Punto 1 - Presión (kPa):  Temperatura (°C):

Punto 2 - Presión (kPa):  Temperatura (°C):

Punto 3 - Presión (kPa):  Temperatura (°C):

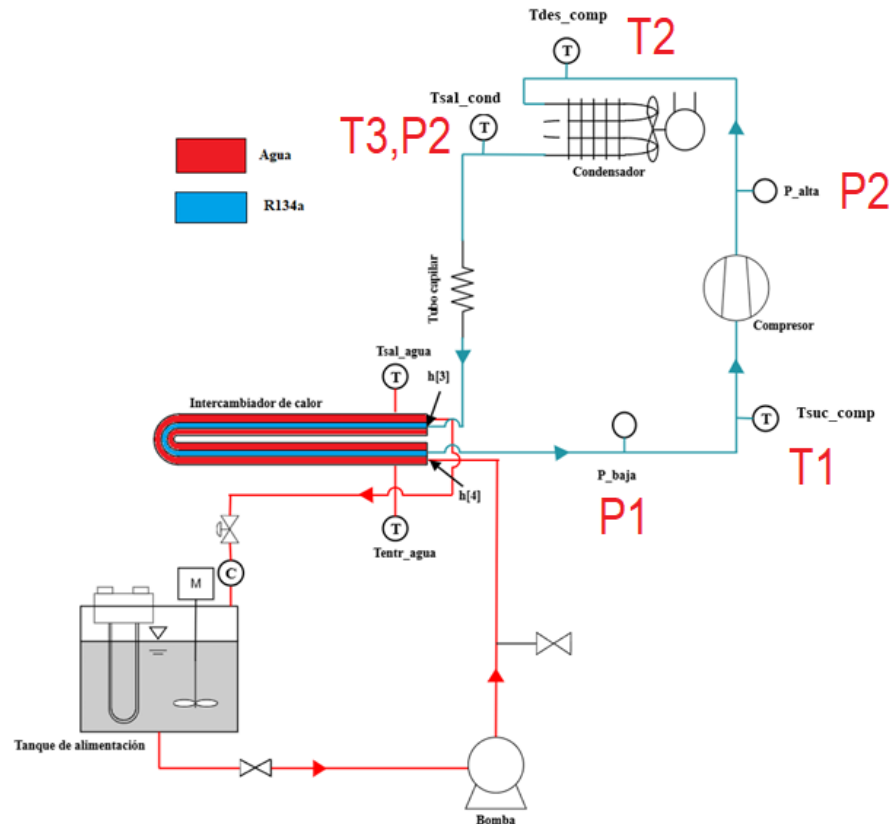
Punto 4 - Presión (kPa):  Temperatura (°C):   Isoentálpico

**Calcular Entalpías y Guardar**

En esta ventana, el usuario debe ingresar los valores de presión y temperatura obtenidos a partir de las lecturas de los manómetros y de los sensores, teniendo en cuenta que dichas presiones deben convertirse a su equivalente presión absoluta antes de ser registradas en los campos de entrada. Este ajuste se requiere para garantizar la coherencia en los cálculos

termodinámicos, ya que la librería utilizada en la interfaz (CoolProp) tiene como condición trabajar con presiones absolutas como variable de entrada.

**Figura 101**



**Tabla 44**

Nomenclatura	Referencia de Ingreso
Punto 1	(P1, T1)
Punto 2	(P2, T2)
Punto 3	(P2, T3)
Punto 4	P2-Isoentalpico

Estos valores se deben ingresar de forma consecutiva siguiendo el esquema de la **figura 32 y de la tabla 1** ya que esto garantiza una correcta visualización del diagrama de Mollier. Adicionalmente para el punto 4 (referente al estado 4), cuenta con la opción de realizar el cálculo bajo la condición de proceso isoentálpico, el cual se habilita mediante la casilla de verificación ubicada al costado derecho del campo de temperatura. Una vez oprimida esta casilla automáticamente el sistema restringe la casilla de temperatura para dicho punto y también asigna la entalpia del punto anterior para cuando se oprime la opción de “Calcular entalpías y guardar”. (Figura 102, Figura 103 y Figura 104)

Figura 102

Entalpía R134a

**Ingrese los datos para 4 puntos**

*⚠ Solo el Punto 4 permite cálculo Isoentálpico*

Punto 1 - Presión (kPa):	<input type="text"/>	Temperatura (°C):	<input type="text"/>
Punto 2 - Presión (kPa):	<input type="text"/>	Temperatura (°C):	<input type="text"/>
Punto 3 - Presión (kPa):	<input type="text"/>	Temperatura (°C):	<input type="text"/>
Punto 4 - Presión (kPa):	<input type="text"/>	Temperatura (°C):	<input type="text"/>

Isoentálpico

Calcular Entalpías y Guardar

Figura 103

Entalpía R134a

**Ingrese los datos para 4 puntos**

*⚠ Solo el Punto 4 permite cálculo Isoentálpico*

Punto 1 - Presión (kPa):	273.7	Temperatura (°C):	19.6
Punto 2 - Presión (kPa):	825.3	Temperatura (°C):	47
Punto 3 - Presión (kPa):	825.3	Temperatura (°C):	30.3
Punto 4 - Presión (kPa):	273.7	Temperatura (°C):	<input type="text"/>

Isoentálpico

Punto 1:  
Entalpía = 416.45 kJ/kg (H1)  
Estado = Sobrecalentado (Estado1)  
Tsat = -1.85 °C (Tsat1)  
hf = 197.52 kJ/kg (Hf1)  
hg = 397.52 kJ/kg (Hg1)

Punto 2:  
Entalpía = 431.29 kJ/kg (H2)  
Estado = Sobrecalentado (Estado2)  
Tsat = 32.43 °C (Tsat2)  
hf = 245.24 kJ/kg (Hf2)  
hg = 415.98 kJ/kg (Hg2)

Punto 3:  
Entalpía = 242.15 kJ/kg (H3)  
Estado = Subenfriado (Estado3)  
Tsat = 32.43 °C (Tsat3)  
hf = 245.24 kJ/kg (Hf3)  
hg = 415.98 kJ/kg (Hg3)

Punto 4:  
Entalpía = 242.15 kJ/kg (H4)  
Estado = Isoentálpico (Estado4)  
Tsat = -1.85 °C (Tsat4)  
hf = 197.52 kJ/kg (Hf4)  
hg = 397.52 kJ/kg (Hg4)

Entalpías calculadas y guardadas.

[Calcular Entalpías y Guardar](#)

**Figura 104**

Punto 1:  
Entalpía = 416.45 kJ/kg (H1)  
Estado = Sobrecalentado (Estado1)  
Tsat = -1.85 °C (Tsat1)  
hf = 197.52 kJ/kg (Hf1)  
hg = 397.52 kJ/kg (Hg1)

Punto 2:  
Entalpía = 431.29 kJ/kg (H2)  
Estado = Sobrecalentado (Estado2)  
Tsat = 32.43 °C (Tsat2)  
hf = 245.24 kJ/kg (Hf2)  
hg = 415.98 kJ/kg (Hg2)

Punto 3:  
Entalpía = 242.15 kJ/kg (H3)  
Estado = Subenfriado (Estado3)  
Tsat = 32.43 °C (Tsat3)  
hf = 245.24 kJ/kg (Hf3)  
hg = 415.98 kJ/kg (Hg3)

Punto 4:  
Entalpía = 242.15 kJ/kg (H4)  
Estado = Isoentalpico (Estado4)  
Tsat = -1.85 °C (Tsat4)  
hf = 197.52 kJ/kg (Hf4)  
hg = 397.52 kJ/kg (Hg4)

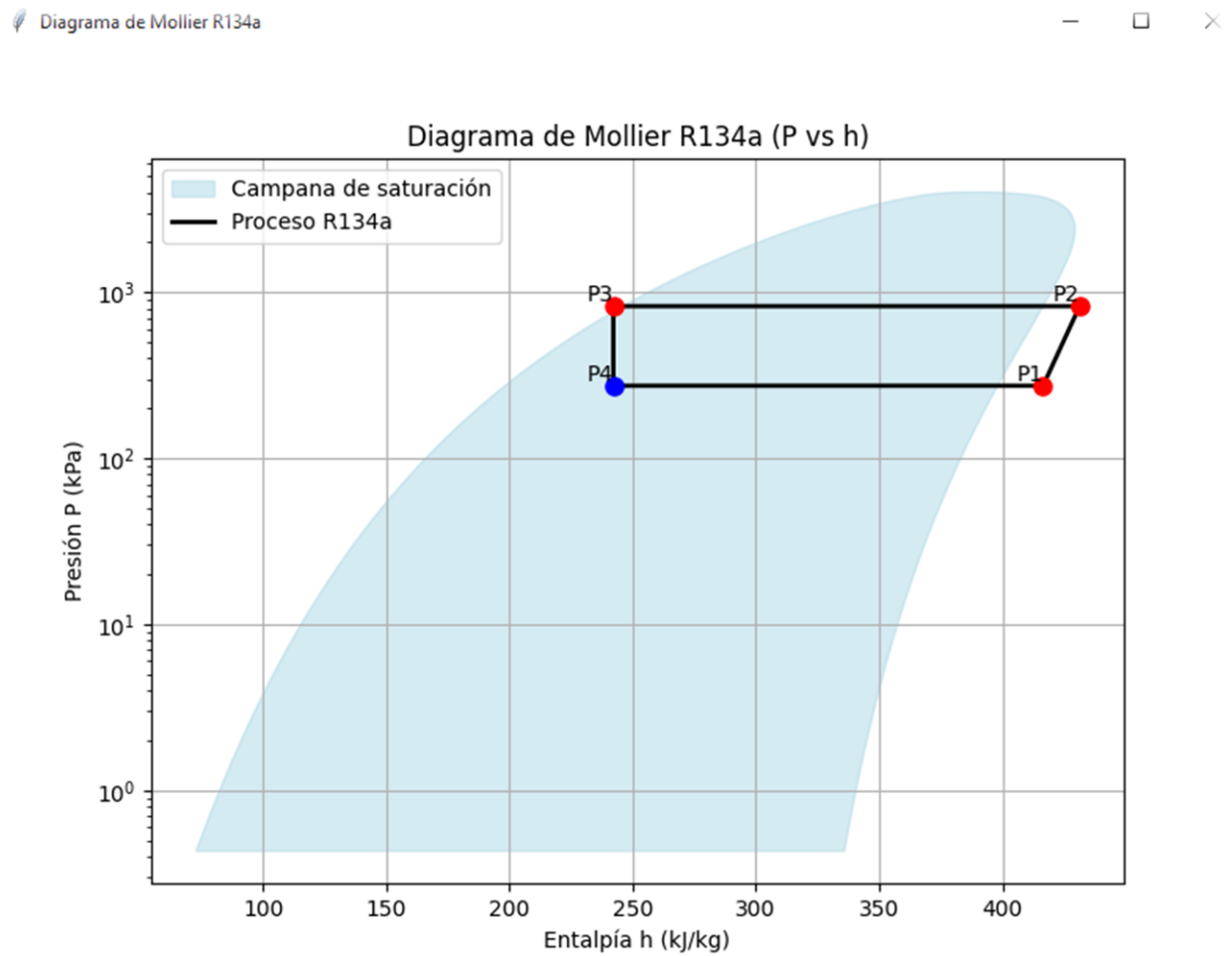
✓ Entalpías calculadas y guardadas.

Calcular Entalpías y Guardar

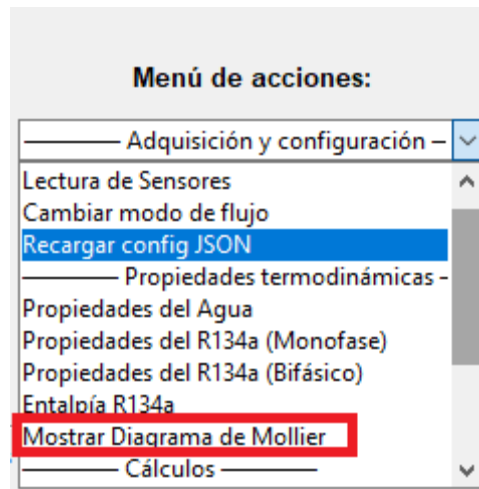
### 6.6 Construcción del diagrama de Mollier

Una vez ingresado y procesado los datos de presión y temperatura en cada uno de los estados, la interfaz generará de manera automática el diagrama de Mollier correspondiente, el cual se desplegará en una ventana emergente (Figura 105). Este diagrama representa gráficamente las propiedades termodinámicas del refrigerante R134a, facilitando la interpretación de los resultados y la verificación del comportamiento del ciclo.

Figura 105



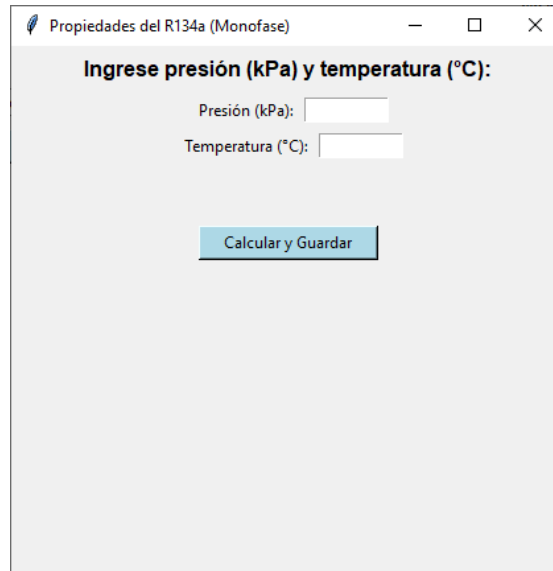
Adicionalmente, el usuario puede acceder al diagrama en cualquier momento a través del **menú desplegable**, seleccionando la opción “*Mostrar Diagrama de Mollier*” (Figura 106).

**Figura 106**

### 6.7 Calculo de propiedades termodinámicas del R134a (Monofase)

Al seleccionar en el menú desplegable la opción "Propiedades del R134a (Monofase)" la interfaz abrirá una ventana tal como en la Figura 107 destinada al cálculo de las propiedades del refrigerante para cuando se encuentra como vapor sobrecalentado. Se deberán ingresar los valores de presión y temperatura correspondientes a las condiciones del punto de interés. Nuevamente la presión deberá ser ingresada en valores absolutos garantizando la coherencia con las rutinas de cálculo de la librería CoolProp.

**Figura 107**



Propiedades del R134a (Monofase)

**Ingrese presión (kPa) y temperatura (°C):**

Presión (kPa):

Temperatura (°C):

Calcular y Guardar

Una vez, digitados los valores se deberá presionar el botón “Calcular y Guardar” con el automáticamente se determinarán las propiedades termodinámicas asociadas (Densidad, Viscosidad, Calor específico, Conductividad y Numero de Prandt) almacenando los datos para luego utilizarlos. Ver (Figura 108)

**Figura 108**

Propiedades del R134a (Monofase)

**Ingrese presión (kPa) y temperatura (°C):**

Presión (kPa): 273.7

Temperatura (°C): 19.6

Densidad: 12.23 kg/m<sup>3</sup>  
Viscosidad: 1.154967e-05 Pa·s  
Calor específico: 883.54 J/kg·K  
Conductividad: 0.0130 W/m·K  
Prandtl: 0.7825

✓ Propiedades del R134a guardadas exitosamente.

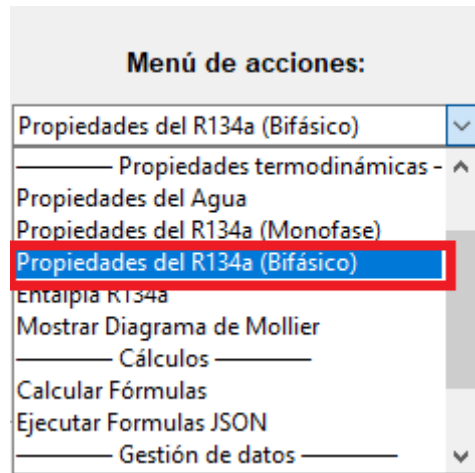
Calcular y Guardar

### 6.8 Calculo de Propiedades Termodinámicas del R134a (Bifásico)

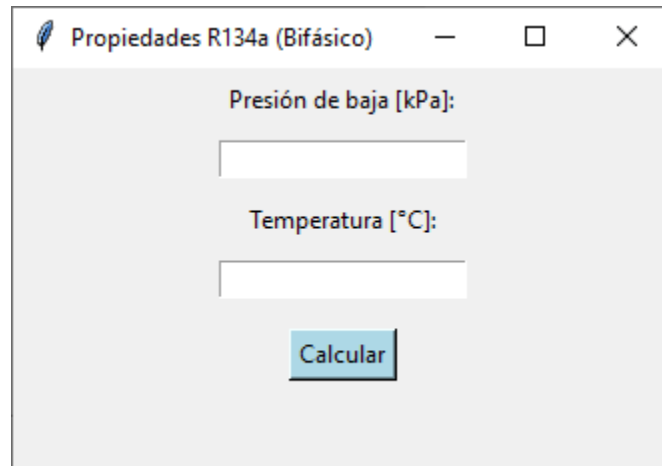
Al elegir la opción “Propiedades del R134a (Bifásico)” en el menú desplegable, la interfaz despliega una ventana como se muestra en las (Figura 109 y Figura 110) destinada al cálculo

de las propiedades termodinámicas del refrigerante cuando coexisten las fases de líquido y vapor dentro del intercambiador.

**Figura 109**



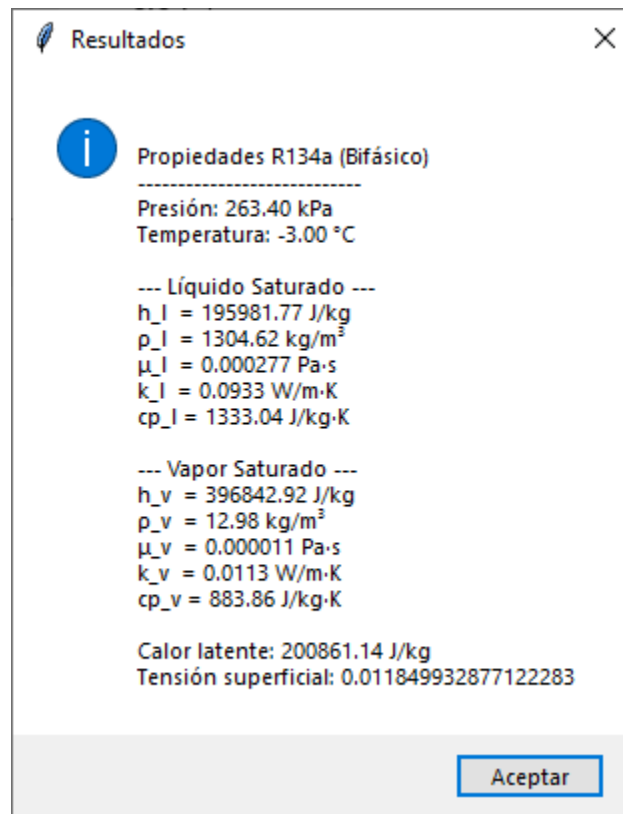
**Figura 110**



Una vez ingresados los datos de temperatura y presión correspondientes, se deberá dar click en la opción de “calcular”. Posteriormente se desplegará una ventana de forma automática donde se mostrarán los resultados de las propiedades tanto para la fase líquida como para la fase de vapor del refrigerante (Ver Figura 111). Estos datos serán almacenados

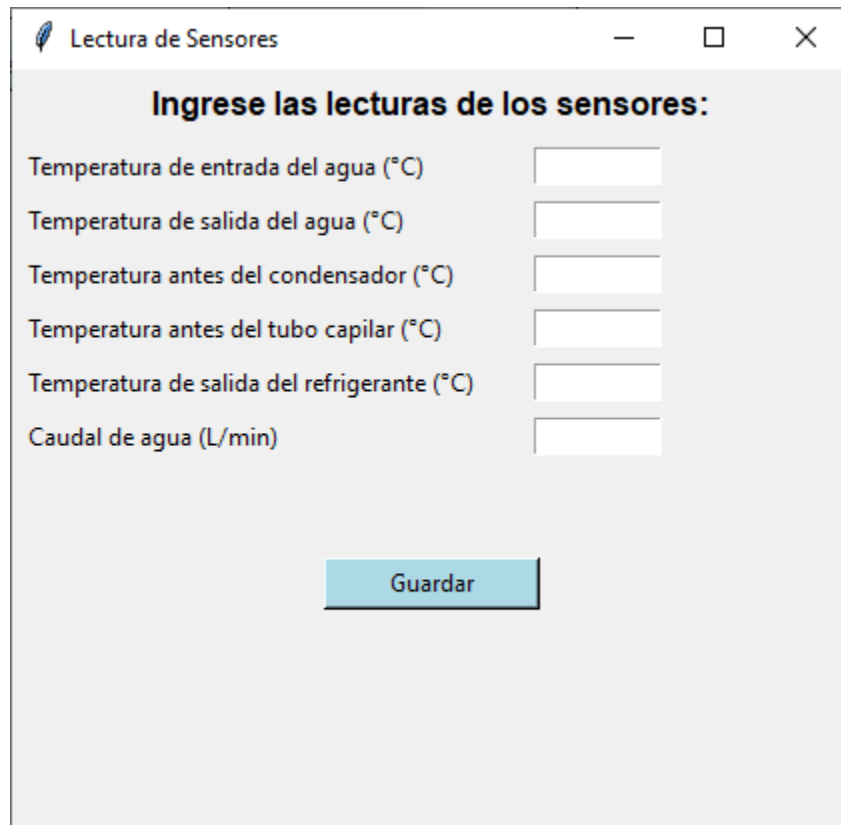
en el directorio de la interfaz y se podrán ver en tiempo real en el baúl de almacenamiento de variables en el panel principal de la interfaz

**Figura 111**



### 6.9 Ingreso de lectura de sensores

Se deberá ingresar a la opción “Lectura de sensores” la interfaz mostrará una ventana para hacer el registro manual de las variables medidas experimentalmente (Figura 112).

**Figura 112**

The image shows a software window titled "Lectura de Sensores" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The window content is a form with the heading "Ingrese las lecturas de los sensores:". Below the heading, there are six input fields, each with a corresponding label to its left: "Temperatura de entrada del agua (°C)", "Temperatura de salida del agua (°C)", "Temperatura antes del condensador (°C)", "Temperatura antes del tubo capilar (°C)", "Temperatura de salida del refrigerante (°C)", and "Caudal de agua (L/min)". At the bottom center of the form is a blue button labeled "Guardar".

En ella, el usuario debe ingresar los valores de temperatura promedio referentes a los datos de cada sensor en el Excel (Figura 96) los cuales corresponden a la entrada y salida del agua, la temperatura del refrigerante antes del condensador, antes del tubo capilar y a la salida del intercambiador, así como el caudal de agua en l/min. Una vez digitados todos los datos, se debe presionar el botón “Guardar”. De esta forma se desplegará un mensaje de texto el cual indicara que los datos se han almacenado exitosamente para su posterior procesamiento (Figura 113).

**Figura 113**

**Lectura de Sensores**

**Ingrese las lecturas de los sensores:**

Temperatura de entrada del agua (°C)	<input type="text" value="26.0"/>
Temperatura de salida del agua (°C)	<input type="text" value="24.8"/>
Temperatura antes del condensador (°C)	<input type="text" value="47"/>
Temperatura antes del tubo capilar (°C)	<input type="text" value="30.3"/>
Temperatura de salida del refrigerante (°C)	<input type="text" value="19.6"/>
Caudal de agua (L/min)	<input type="text" value="3.77"/>

Valores guardados:  
 Tent\_agua = 26.00 °C  
 Tsal\_agua = 24.80 °C  
 T[1] = 47.00 °C  
 T[2] = 30.30 °C  
 T[4] = 19.60 °C  
 Caudal = 0.000063 m³/s

✓ Valores guardados exitosamente.

### 6.9. Cargue y ejecución del archivo de fórmulas JSON

El archivo de fórmulas JSON se encuentra ubicado dentro de la carpeta “Proyecto Intercambiador de Calor” subcarpeta “código python” (ver Figura 114).

**Figura 114**

formulas	3/10/2025 8:09 a. m.	Archivo de origen JSON	4 KB
Interfaz	2/10/2025 10:22 p. m.	Python File	39 KB

Dentro del entorno de Visual Studio Code este se visualiza en el panel de control izquierdo (Figura 115), una vez se selecciona esta muestra todas las fórmulas que se encuentran presentes para la interfaz. (ver

**Figura 116).**

Figura 115

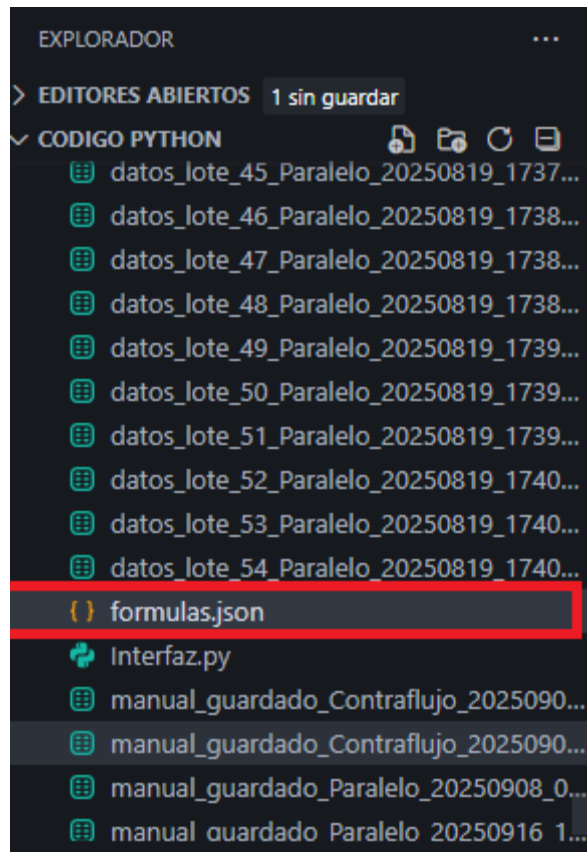


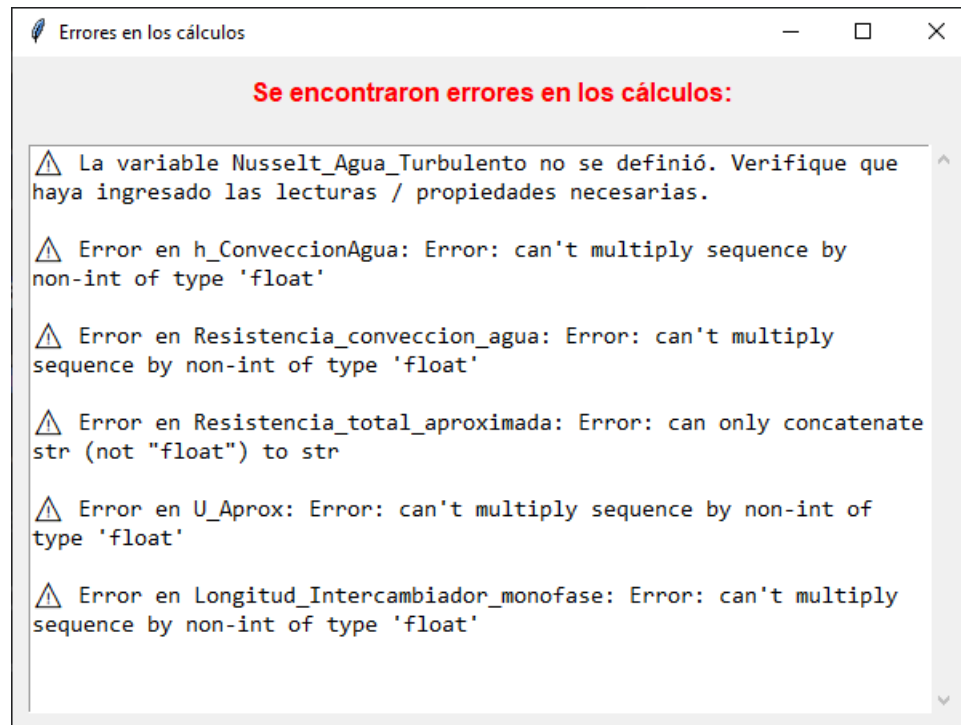
Figura 116

```

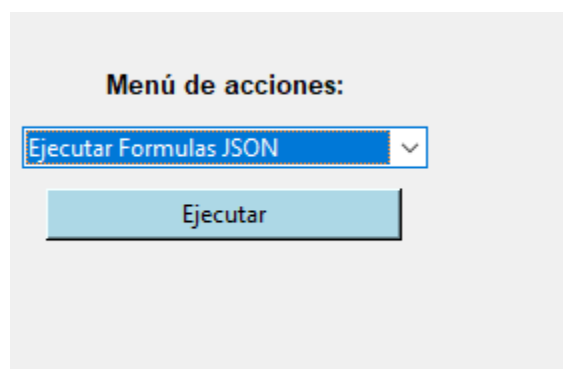
1  {
2    "Longitud_Intercambiador": { "value": 0.66, "units": "m" },
3    "Conductividad_material_Intercambiador": { "value": 400, "units": "W/m*K" },
4    "Diametro_exterior": { "value": 0.019, "units": "m" },
5    "Diametro_interior": { "value": 0.004, "units": "m" },
6    "Area_interior": { "formula": "3.1416 * Diametro_interior * Longitud_Intercambiador", "units": "m^2" },
7    "Area_exterior": { "formula": "3.1416 * Diametro_exterior * Longitud_Intercambiador", "units": "m^2" },
8    "Flujo_Masico_agua": { "formula": "Caudal_bomba * Densidad_Agua", "units": "kg/s" },
9    "Capacidad_Calorifica_Agua": { "formula": "Flujo_Masico_agua * Cp_Agua", "units": "W/K" },
10   "Diametro_Hidraulico": { "formula": "Diametro_exterior - Diametro_interior", "units": "m" },
11   "Q_Agua": { "formula": "Flujo_Masico_agua * Cp_Agua*(Tsal_agua-Tent_agua)", "units": "W" },
12   "Q_R134a": { "formula": "Q_Agua", "units": "W" },
13   "Velocidad_Agua": { "formula": "Caudal_bomba / (3.1416*(Diametro_Hidraulico**2)/4)", "units": "m/s" },
14   "Reynolds_Agua": { "formula": "Densidad_Agua * Velocidad_Agua * Diametro_Hidraulico / Viscosidad_Agua", "units": "-" },
15   "factor_Friccion_Agua_Turbulento": { "formula": "1/(0.79*math.log(Reynolds_Agua-1.64)**2)", "units": "-" },
16   "Nusselt_Agua": { "formula": "((factor_Friccion_Agua_Turbulento/8)*(Reynolds_Agua-1000)*Prandtl_Agua)/(1+12.7*(factor_Friccion_Agua_Turbulento**0.45)*(Reynolds_Agua**0.14)*(Prandtl_Agua**0.4))", "units": "-" },
17   "h_ConveccionAgua": { "formula": "Nusselt_Agua * Conductividad_Agua / Diametro_Hidraulico", "units": "W/m^2*K" },
18   "Resistencia_conveccion_agua": { "formula": "1/(h_ConveccionAgua*Area_exterior)", "units": "K/W" },
19   "Resistencia_Conduccion": { "formula": "math.log(Diametro_exterior/Diametro_interior)/(2*math.pi*Conductividad_material_Intercambiador)", "units": "K/W" },
20   "Flujo_Masico_R134a": { "formula": "Q_R134a/((H1-H3)*1000)", "units": "kg/s" },
21   "Reynolds_R134a_Monofase": { "formula": "(4* Flujo_Masico_R134a)/(Viscosidad_R134a*3.1416*(Diametro_interior)**2)", "units": "-" },
22   "Nusselt_R134a_Monofase": { "formula": "0.023 * (Reynolds_R134a_Monofase**0.8)*(Prandtl_R134a**0.4)", "units": "-" },
23   "h_ConveccionR134a_Monofase": { "formula": "(Nusselt_R134a_Monofase * Conductividad_R134a) / Diametro_interior", "units": "W/m^2*K" },
24   "Resistencia_conveccion_R134a_Monofase": { "formula": "1/(h_ConveccionR134a_Monofase*Area_interior)", "units": "K/W" },
25   "Resistencia_total_aproximada": { "formula": "Resistencia_conveccion_agua + Resistencia_Conduccion + Resistencia_conveccion_R134a_Monofase", "units": "K/W" },
26   "U_Aprox": { "formula": "1/(Resistencia_total_aproximada*Area_interior)", "units": "W/m^2*K" },
27   "Temperatura_media_agua": { "formula": "((Flujo_Masico_R134a*(H1-Hg1))/(Flujo_Masico_agua*(Cp_Agua/1000))+Tsal_agua)", "units": "K" },
28   "LMTD": { "formula": "calcular_LMTD()", "units": "K" },
29   "Q_sensibleR134a_monofase": { "formula": "Flujo_Masico_R134a*(H1-Hg1)", "units": "kW" },
30   "Longitud_Intercambiador_monofase": { "formula": "(Q_sensibleR134a_monofase*1000)/(U_Aprox*3.1416*Diametro_interior*LMTD)", "units": "m" },
31   "Longitud_bifasica": { "formula": "Longitud_Intercambiador - Longitud_Intercambiador_monofase", "units": "m" },
32   "Q_total": { "formula": "Q_Agua", "units": "W" },
  }

```

Este archivo es editable, para el usuario. Sin embargo, se debe tener especial cuidado al modificarlo, ya que cualquier error en la notación de alguna ecuación puede generar fallas o resultados incorrectos tal como se evidencia en la Figura 117. Por lo cual, se recomienda utilizar el siguiente enlace <https://jsonlint.com/>, el cual le permita validar y verificar la correcta estructura de las ecuaciones que sean agregadas.

**Figura 117**

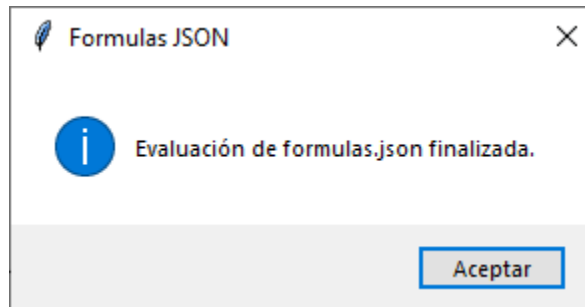
Por último, nos dirigimos nuevamente al menú de opciones y ejecutamos la opción “Ejecutar formulas JSON” seguido del botón ejecutar. (ver Figura 118 **Figura 118**)

**Figura 118**

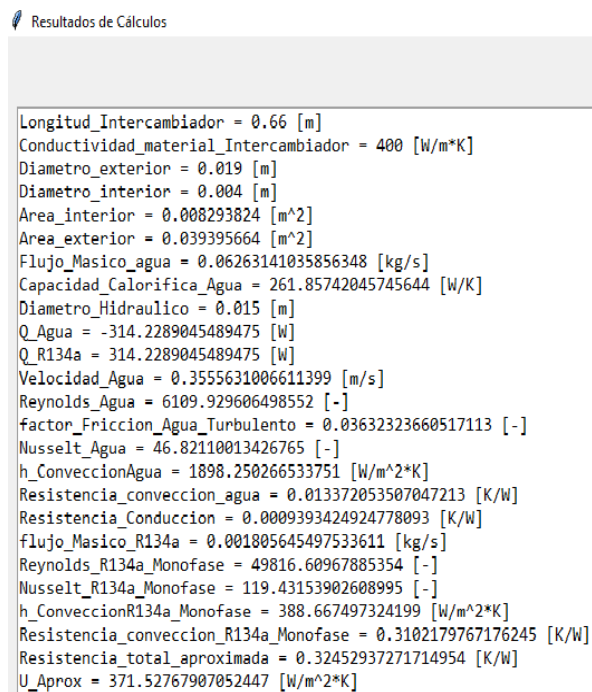
Aparecerá una ventana emergente como en la Figura 119, la cual indicara que se han terminado de evaluar todas las fórmulas presentes en el archivo JSON para la posterior

visualización de los resultados utilizando la opción del menú “Calcular Formulas”. (ver Figura 120)

**Figura 119**

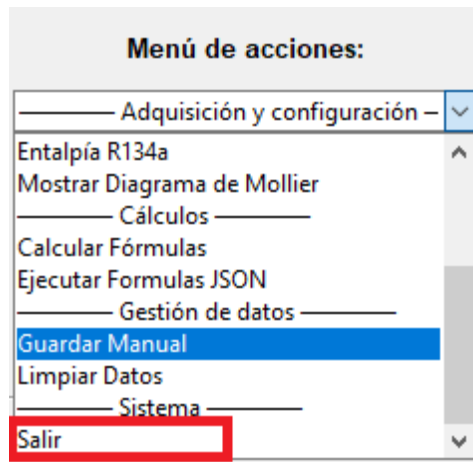


**Figura 120**

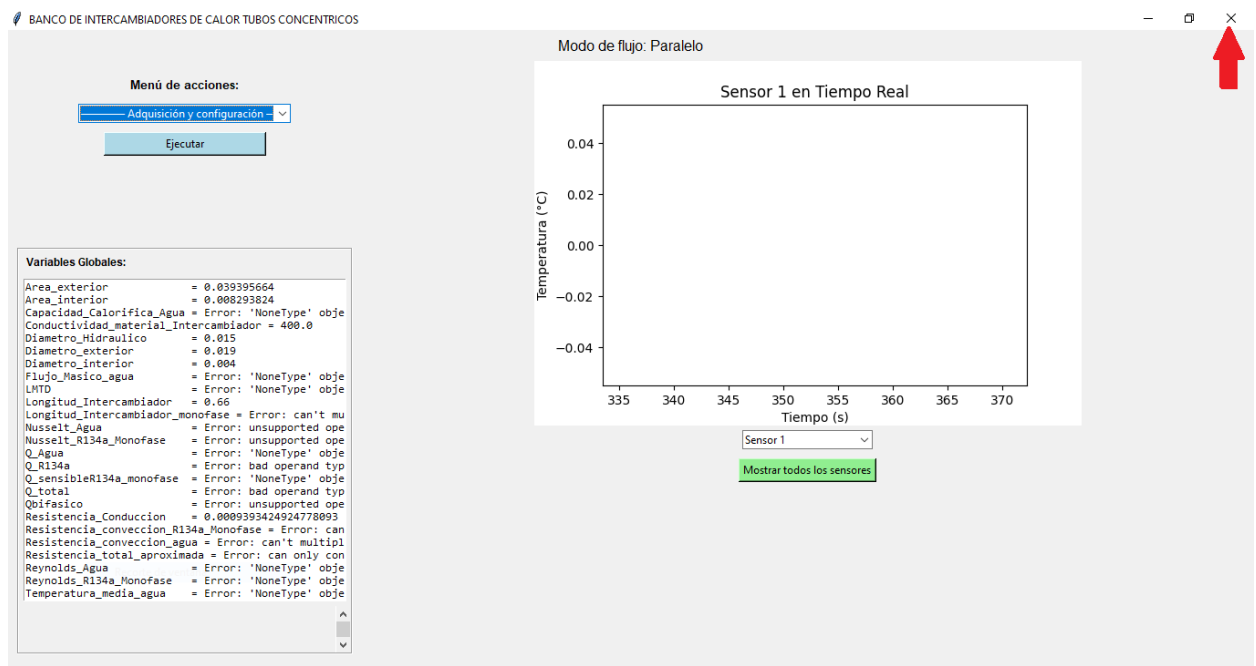


Después de haber obtenido los resultados el usuario podrá salir de la interfaz por medio del botón salir ubicado en el menú desplegable o cerrando el panel de control de la interfaz (Ver Figura 121 y Figura 122).

**Figura 121**



**Figura 122**





**Apéndice J. Código Python**

```
import pandas as pd

import threading

from datetime import datetime

import tkinter as tk

from tkinter import ttk, messagebox

import matplotlib.pyplot as plt

from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

import json

import os

import math

import serial

import CoolProp.CoolProp as CP

from CoolProp.CoolProp import PropsSI

import re

import numpy as np

# ----- Configuración inicial -----

arduino = serial.Serial('COM5', 9600, timeout=1)

datos = []

lote = 1

modo_flujo = "Paralelo"

tiempos = []
```

```
sensores = {1: [], 2: [], 3: [], 4: [], 5: []}
```

```
sensor_seleccionado = 1
```

```
# ----- Configuración y variables globales -----
```

```
ruta_config = "config_calculos.json"
```

```
ruta_formulas_json = "formulas.json"
```

```
config_data = {}
```

```
global_vars = {}
```

```
auto_formulas = {}
```

```
def sanitize_name(name: str) -> str:
```

```
    s = "".join(ch if ch.isalnum() else "_" for ch in name).strip("_")
```

```
    if not s:
```

```
        s = "var"
```

```
    if s[0].isdigit():
```

```
        s = "v_" + s
```

```
    return s.lower()
```

```
def load_config():
```

```
    global config_data, global_vars
```

```
    config_data = {}
```

```
    preserved = {k: v for k, v in global_vars.items() if k not in ('__from_config',)}
```

```
    global_vars = {}
```

```
    if os.path.exists(ruta_config):
```

```
try:
    with open(ruta_config, "r") as f:
        config_data = json.load(f)
except Exception as e:
    print("Error cargando config_calculos.json:", e)
    config_data = {}

def recurse(prefix, obj):
    if isinstance(obj, dict):
        if "value" in obj:
            name = prefix
            sanitized = sanitize_name(name)

            try:
                val = to_number(obj["value"])
            except Exception:
                try:
                    val = to_number(str(obj["value"]).replace(",", "."))
                except Exception:
                    val = obj["value"]

            global_vars[name] = val
            global_vars[sanitized] = val
        else:
            for k, v in obj.items():
                newpref = f"{prefix}_{k}" if prefix else k
```

```
        recurse(newpref, v)

    else:

        try:

            val = to_number(obj)

        except Exception:

            val = obj

        name = prefix

        sanitized = sanitize_name(name)

        global_vars[name] = val

        global_vars[sanitized] = val

if isinstance(config_data, dict):

    for k, v in config_data.items():

        recurse(k, v)

global_vars.update(preserved)

global_vars['__from_config'] = True

load_config()

# ----- Cargar fórmulas guardadas -----

ruta_formulas = "formulas_guardadas.json"

def cargar_formulas():

    if os.path.exists(ruta_formulas):
```

```
        with open(ruta_formulas, "r") as f:
            return json.load(f)

return {}

def guardar_formulas(formulas):
    with open(ruta_formulas, "w") as f:
        json.dump(formulas, f, indent=2)

formulas_guardadas = cargar_formulas()

# ----- Cargar auto formulas (formulas.json) -----

def load_auto_formulas():
    global auto_formulas
    auto_formulas = {}
    if os.path.exists(ruta_formulas_json):
        try:
            with open(ruta_formulas_json, "r", encoding="utf-8") as f:
                j = json.load(f)
                for k, v in j.items():
                    if isinstance(v, dict):
                        entry = {}
                        if "formula" in v:
                            entry["formula"] = v["formula"]
                        if "value" in v:
```

```
        entry["value"] = v["value"]

        entry["units"] = v.get("units", "")

        if "formula" in entry or "value" in entry:

            auto_formulas[k] = entry

        elif isinstance(v, (int, float)):

            auto_formulas[k] = {"value": v, "units": ""}

        elif isinstance(v, str):

            auto_formulas[k] = {"formula": v, "units": ""}

    except Exception as e:

        print("Error cargando formulas.json:", e)

    else:

        print("No existe formulas.json en la carpeta.")

NUM_PATTERN = re.compile(r"[-+]?d*\.\?d+(?:[eE][-+]?d+)?")

def to_number(x):

    if isinstance(x, (int, float)):

        return float(x)

    if isinstance(x, str):

        s = x.strip().replace(",", ".")

        m = NUM_PATTERN.search(s)

        if m:

            try:

                return float(m.group(0))
```

```
    except Exception:
        pass

    return x

load_auto_formulas()

# ----- Evaluación automática de las fórmulas -----

def evaluate_auto_formulas(show_message=True):
    global global_vars, auto_formulas

    import math

    from tkinter import messagebox

    # preparar contexto numérico

    numeric_globals = {k: to_number(v) for k, v in global_vars.items()}

    local_ctx = {name: getattr(math, name) for name in dir(math) if not name.startswith("__")}

    local_ctx['pi'] = math.pi

    local_ctx['e'] = math.e

    local_ctx['math'] = math

    local_ctx.update(numeric_globals)

    results = {}

    # ◆ PRIMERO: cargar todos los "value" directos antes de evaluar fórmulas
```

```
for name, entry in auto_formulas.items():

    if "value" in entry and "formula" not in entry:

        val = to_number(entry["value"])

        results[name] = (str(entry["value"]), val, entry.get("units", ""))

        global_vars[name] = val

        global_vars[sanitize_name(name)] = val

        local_ctx[name] = val

        local_ctx[sanitize_name(name)] = val

# ◆ SEGUNDO: evaluar las fórmulas que dependen de los valores ya cargados

for name, entry in auto_formulas.items():

    try:

        eval_locals = dict(local_ctx)

        # incluir resultados ya calculados

        for k_prev, v_prev in results.items():

            eval_locals[k_prev] = v_prev[1]

            eval_locals[sanitize_name(k_prev)] = v_prev[1]

        # asegurar nombres limpios

        for k in list(eval_locals.keys()):

            eval_locals[sanitize_name(str(k))] = eval_locals[k]
```

```
# evaluar valor o fórmula

if "value" in entry and "formula" not in entry:

    val = to_number(entry["value"])

    expr_str = str(entry["value"])

else:

    expr = str(entry.get("formula", ""))

    expr_eval = expr.replace("^", "**").replace(",",".")

    val = eval(expr_eval, {"__builtins__": None}, eval_locals)

    expr_str = expr

results[name] = (expr_str, val, entry.get("units", ""))

global_vars[name] = val

global_vars[sanitize_name(name)] = val

local_ctx[name] = val

local_ctx[sanitize_name(name)] = val

except Exception as e:

    results[name] = (

        entry.get("formula", entry.get("value", "")),

        f"Error: {e}",

        entry.get("units", "")

    )

    global_vars[name] = results[name][1]

    global_vars[sanitize_name(name)] = results[name][1]
```

```
# ◆ Mostrar mensaje final (opcional)
```

```
if show_message:
```

```
    try:
```

```
        messagebox.showinfo("Formulas JSON", "Evaluación de formulas.json finalizada.")
```

```
    except Exception:
```

```
        pass
```

```
return results
```

```
# ◆ Ejecutar automáticamente si hay fórmulas cargadas
```

```
if auto_formulas:
```

```
    evaluate_auto_formulas(show_message=False)
```

```
# ----- Evaluador general de fórmulas (con soporte LMTD) -----
```

```
def calcular_resultados(formulas, variables):
```

```
    # Validaciones antes de calcular
```

```
    if not ensure_sensores():
```

```
        return {}
```

```
    if not ensure_propiedades_agua():
```

```
        return {}
```

```
    if not ensure_propiedades_r134a():
```

```
    return {}

resultados = {}

allowed_names = {
    "math": math,
    **variables,
    "calcular_LMTD": lambda: calcular_LMTD(variables)
}

for nombre, props in formulas.items():
    formula = props.get("formula")
    if formula:
        try:
            resultados[nombre] = eval(formula, {"__builtins__": {}}, allowed_names)
        except Exception as e:
            resultados[nombre] = f"Error: {e}"
    elif "value" in props:
        resultados[nombre] = props["value"]
    else:
        resultados[nombre] = None

return resultados
```

```
# ----- Asegurar propiedades del agua -----
```

```
def ensure_propiedades_agua():
```

```
    necesarios
```

```
    =
```

```
["Densidad_Agua","Viscosidad_Agua","Cp_Agua","Conductividad_Agua","Prandtl_Agua"]
```

```
if not all(k in global_vars for k in necesarios):
```

```
    try:
```

```
        # preferencia: Tent_agua (sensor) > Tref_agua (manual) > 25°C (default)
```

```
        T_C = None
```

```
        if "Tent_agua" in global_vars:
```

```
            T_C = to_number(global_vars["Tent_agua"])
```

```
        elif "Tref_agua" in global_vars:
```

```
            T_C = to_number(global_vars["Tref_agua"])
```

```
        else:
```

```
            T_C = 25.0
```

```
        # asegurar float y convertir a K
```

```
        T_C = float(T_C)
```

```
        T_K = T_C + 273.15
```

```
        P = 90700 # presión atmosférica en Pa
```

```
        rho = CP.PropsSI('D','T',T_K,'P',P,'Water')
```

```
        mu = CP.PropsSI('V','T',T_K,'P',P,'Water')
```

```
        cp = CP.PropsSI('C','T',T_K,'P',P,'Water')
```

```
        k = CP.PropsSI('L','T',T_K,'P',P,'Water')
```

```
        pr = (cp*mu)/k
```

```

updates = {
    "Densidad_Agua": rho, "Viscosidad_Agua": mu,
    "Cp_Agua": cp, "Conductividad_Agua": k,
    "Prandtl_Agua": pr
}

global_vars.update(updates)

# opcional: también añadir saneados

for k, v in updates.items():
    global_vars[sanitize_name(k)] = v

except Exception as e:
    print("Error calculando propiedades del agua:", e)

# ----- Funciones de validacion -----

def ensure_propiedades_r134a():
    # Comprueba si las propiedades R134a ya están en global_vars
    needed = [
        "Densidad_R134a", "Viscosidad_R134a", "Cp_R134a", "Conductividad_R134a", "Prandtl_R
134a"]

    if all(k in global_vars for k in needed):
        return True

    # Si no están, avisar al usuario (no intentamos calcular sin P/T válidos)
    msg = ("Las propiedades del R134a (monofase) no están definidas.\n\n"
           "Abre 'Propiedades del R134a (Monofase)' en el menú y calcula con P/T para
guardarlas.\n\n")

```

```
        "¿Quieres abrir ahora la ventana de propiedades del R134a?")
    if messagebox.askyesno("Faltan propiedades R134a", msg):
        abrir_propiedades_r134a()
    return False

def ensure_sensores():
    needed = ["Tent_agua", "Tsal_agua", "Caudal_bomba"]
    if all(k in global_vars for k in needed):
        return True
    msg = ("Las lecturas de sensores no están completas.\n\n"
          "Abre la ventana de 'Lectura de Sensores' e ingresa los valores.\n\n"
          "¿Quieres abrirla ahora?")
    if messagebox.askyesno("Faltan lecturas de sensores", msg):
        abrir_lectura_sensores()
    return False

def ensure_propiedades_agua():
    needed = ["Densidad_Agua", "Viscosidad_Agua", "Cp_Agua", "Conductividad_Agua",
             "Prandtl_Agua"]
    if all(k in global_vars for k in needed):
        return True
    msg = ("Las propiedades del Agua no están definidas.\n\n"
          "Abre 'Propiedades del Agua' en el menú e ingresa los valores.\n\n"
          "¿Quieres abrirla ahora?")
```

```
if messagebox.askyesno("Faltan propiedades del Agua", msg):
    abrir_propiedades_agua()

return False

# ----- Funciones de botones -----

def guardar_manual():
    if datos:
        df = pd.DataFrame(datos, columns=[
            "FechaHora", "Sensor1 (°C)", "Sensor2 (°C)", "Sensor3 (°C)", "Sensor4 (°C)", "Sensor5
(°C)", "Flujo (L/min)"])
        nombre_archivo =
f"manual_guardado_{modo_flujo}_{datetime.now().strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.xl
sx"
        df.to_excel(nombre_archivo, index=False)
        print(f"Guardado manual: {nombre_archivo}")
        messagebox.showinfo("Guardado", f"Archivo guardado: {nombre_archivo}")
    else:
        print("No hay datos para guardar")
        messagebox.showwarning("Sin datos", "No hay datos para guardar.")

def limpiar_datos():
    global datos, tiempos, sensores
    datos.clear()
    tiempos.clear()
```

```
for i in sensores:

    sensores[i].clear()

print("Datos limpiados.")

def salir():

    ventana.destroy()

    arduino.close()

def abrir_lectura_sensores():

    sens_win = tk.Toplevel(ventana)

    sens_win.title("Lectura de Sensores")

    sens_win.geometry("420x380")

    tk.Label(sens_win, text="Ingrese las lecturas de los sensores:",

font=("Arial",12,"bold")).pack(pady=5)

    etiquetas = {

        "Tent_agua": "Temperatura de entrada del agua (°C)",

        "Tsal_agua": "Temperatura de salida del agua (°C)",

        "T[1]": "Temperatura antes del condensador (°C)",

        "T[2]": "Temperatura antes del tubo capilar (°C)",

        "T[4]": "Temperatura de salida del refrigerante (°C)"

    }

    entradas = {}
```

```
for key, texto in etiquetas.items():

    frame = tk.Frame(sens_win)

    frame.pack(pady=3, anchor="w")

    tk.Label(frame, text=texto, width=35, anchor="w").pack(side="left", padx=5)

    ent = tk.Entry(frame, width=10)

    ent.pack(side="left")

    entradas[key] = ent

# ◆ Campo para el caudal (ingresado en L/min, convertido a m3/s)

frame_caudal = tk.Frame(sens_win)

frame_caudal.pack(pady=3, anchor="w")

    tk.Label(frame_caudal, text="Caudal de agua (L/min)", width=35,
anchor="w").pack(side="left", padx=5)

caudal_entry = tk.Entry(frame_caudal, width=10)

caudal_entry.pack(side="left")

entradas["Caudal"] = caudal_entry

resultado_label = tk.Label(sens_win, text="", font=("Arial",10), justify="left")

resultado_label.pack(pady=10)

def guardar_valores(entradas, resultado_label):

    try:
```

```
resultados = {}

for key, entry in entradas.items():

    if entry.get():

        val = float(entry.get())

        if key == "Caudal":

            # ◆ Conversión de L/min a m³/s

            val_m3s = val / 1000.0 / 60.0

            resultados["Caudal"] = val_m3s

            # Guardar en global_vars como Caudal y Caudal_bomba

            global_vars["Caudal"] = val_m3s

            global_vars["Caudal_bomba"] = val_m3s

            global_vars[sanitize_name("Caudal")] = val_m3s

            global_vars[sanitize_name("Caudal_bomba")] = val_m3s

        else:

            resultados[key] = val

            global_vars[key] = val

            global_vars[sanitize_name(key)] = val

# Mostrar confirmación

texto = "Valores guardados:\n"

for k,v in resultados.items():
```

```
    if "T" in k:
        texto += f"{k} = {v:.2f} °C\n"

    elif "Caudal" in k:
        texto += f"{k} = {v:.6f} m³/s\n"

texto += "\n✓ Valores guardados exitosamente."

resultado_label.config(text=texto)

# --- Actualizar propiedades del agua automáticamente ---
ensure_propiedades_agua()

# Re-evaluar fórmulas para que reflejen los cambios inmediatamente
if auto_formulas:
    evaluate_auto_formulas(show_message=False)

except Exception as e:
    resultado_label.config(text=f"Error: {e}")

tk.Button(sens_win, text="Guardar", command=lambda: guardar_valores(entradas,
resultado_label), bg="lightblue", width=14).pack(pady=5)

def abrir_propiedades_agua():
    prop_win = tk.Toplevel(ventana)
```

```

prop_win.title("Propiedades del Agua")

prop_win.geometry("420x360")

tk.Label(prop_win, text="Temperatura de referencia (°C):").pack(pady=5)

temp_entry = tk.Entry(prop_win, width=12)

temp_entry.pack()

temp_entry.insert(0, "25.0")

resultado_label = tk.Label(prop_win, text="", justify="left", font=("Arial", 10))

resultado_label.pack(pady=10)

def calcular_propiedades():

    try:

        T_C = float(temp_entry.get())

        global_vars["Tref_agua"] = T_C

        T_K = T_C + 273.15

        P = 90700

        rho = CP.PropsSI('D','T',T_K,'P',P,'Water')

        mu = CP.PropsSI('V','T',T_K,'P',P,'Water')

        cp = CP.PropsSI('C','T',T_K,'P',P,'Water')

        k = CP.PropsSI('L','T',T_K,'P',P,'Water')

        pr = (cp*mu)/k

        resultado = f"Densidad: {rho:.2f} kg/m³\nViscosidad: {mu:.6e} Pa·s\nCalor
específico: {cp:.2f} J/kg·K\nConductividad: {k:.4f} W/m·K\nPrandtl: {pr:.4f}"

        # Guardar propiedades en global_vars

        updates = {

            "Densidad_Agua": rho, "densidad_agua": rho,

```

```

    "Viscosidad_Agua": mu, "viscosidad_agua": mu,

    "Cp_Agua": cp, "cp_agua": cp,

    "Conductividad_Agua": k, "conductividad_agua": k,

    "Prandtl_Agua": pr, "prandtl_agua": pr
}

global_vars.update(updates)

# asegurar saneados

for k, v in updates.items():

    global_vars[sanitize_name(k)] = v

    resultado_label.config(text=resultado + "\n\n✓ Propiedades guardadas
exitosamente.")

# reevaluar formulas

if auto_formulas:

    evaluate_auto_formulas(show_message=False)

except Exception as e:

    resultado_label.config(text=f"Error: {e}")

tk.Button(prop_win, text="Calcular y Guardar", command=calcular_propiedades,
bg="lightblue", width=18).pack(pady=5)

tk.Button(prop_win, text="Recargar config JSON", command=lambda: (load_config(),
load_auto_formulas(),messagebox.showinfo("OK","Config recargada y formulas
recargadas"))).pack(pady=3)

```

```
# Definir entradas y iso_flags como variables globales para acceso en otras funciones
```

```
entradas = []
```

```
iso_flags = []
```

```
def abrir_entalpia_r134a():
```

```
    global entradas, iso_flags
```

```
    entradas = [] # ◆ reinicia la lista al abrir la ventana
```

```
    iso_flags = [] # ◆ reinicia la lista al abrir la ventana
```

```
    ent_win = tk.Toplevel(ventana)
```

```
    ent_win.title("Entalpía R134a")
```

```
    ent_win.geometry("520x450")
```

```
        tk.Label(ent_win, text="Ingrese los datos para 4 puntos", font=("Arial", 12,
"bold")).pack(pady=5)
```

```
        tk.Label(ent_win, text="⚠ Solo el Punto 4 permite cálculo Isoentálpico", font=("Arial",
9, "italic"), fg="red").pack(pady=3)
```

```
    for i in range(4):
```

```
        frame = tk.Frame(ent_win)
```

```
        frame.pack(pady=3, anchor="w")
```

```
        tk.Label(frame, text=f"Punto {i+1} - Presión (kPa):").grid(row=0, column=0, padx=3)
```

```
pres_entry = tk.Entry(frame, width=8)
pres_entry.grid(row=0, column=1, padx=3)

tk.Label(frame, text="Temperatura (°C):").grid(row=0, column=2, padx=3)
temp_entry = tk.Entry(frame, width=8)
temp_entry.grid(row=0, column=3, padx=3)

if i == 3: # ◆ solo en Punto 4

    iso_var = tk.IntVar()

    tk.Checkbutton(

        frame, text="Isoentálpico", variable=iso_var,

        command=lambda e=temp_entry, var=iso_var: e.config(

            state="disabled" if var.get() else "normal"

        )

    ).grid(row=0, column=4, padx=5)

else:

    iso_var = tk.IntVar(value=0)

entradas.append((pres_entry, temp_entry))

iso_flags.append(iso_var)

resultado_label = tk.Label(ent_win, text="", justify="left", font=("Arial", 10))
resultado_label.pack(pady=10)
```

```
def calcular_entalpias():
    resultados = ""
    try:
        h_prev = None
        for i, ((pres_entry, temp_entry), iso_var) in enumerate(zip(entradas, iso_flags)):
            if pres_entry.get():
                P_Pa = float(pres_entry.get()) * 1000

                # Proceso isoentalpico

                if iso_var.get() and h_prev is not None:
                    h_kJ = h_prev

                    # Determinar temperatura aproximada a esa presión usando CoolProp inverso

                    try:
                        T_K = CP.PropsSI('T', 'P', P_Pa, 'H', h_kJ*1000, 'R134a')
                        T_C = T_K - 273.15
                    except Exception:
                        T_C = None

                    estado = "Isoentalpico"

                    Tsat_C = CP.PropsSI('T', 'P', P_Pa, 'Q', 0, 'R134a') - 273.15

                    hf = CP.PropsSI('H', 'P', P_Pa, 'Q', 0, 'R134a') / 1000.0
                    hg = CP.PropsSI('H', 'P', P_Pa, 'Q', 1, 'R134a') / 1000.0

                else:
                    if temp_entry.get():
```

```
T_K = float(temp_entry.get()) + 273.15
h = CP.PropsSI('H', 'T', T_K, 'P', P_Pa, 'R134a')
h_kJ = h / 1000.0

Tsat_C = CP.PropsSI('T', 'P', P_Pa, 'Q', 0, 'R134a') - 273.15
hf = CP.PropsSI('H', 'P', P_Pa, 'Q', 0, 'R134a') / 1000.0
hg = CP.PropsSI('H', 'P', P_Pa, 'Q', 1, 'R134a') / 1000.0

if T_K < Tsat_C + 273.15:
    estado = "Subenfriado"
elif abs(T_K - (Tsat_C + 273.15)) < 0.5:
    estado = "Saturado"
else:
    estado = "Sobrecalentado"

else:
    resultados += f"Punto {i+1}: faltan datos de temperatura.\n\n"
    continue

idx = i+1
global_vars[f'H{idx}'] = h_kJ
global_vars[f'Estado{idx}'] = estado
global_vars[f'Tsat{idx}'] = Tsat_C
global_vars[f'Hf{idx}'] = hf
global_vars[f'Hg{idx}'] = hg
```

```

resultados += (
    f'Punto {idx}:\n'
    f' Entalpía = {h_kJ:.2f} kJ/kg (H{idx})\n'
    f' Estado = {estado} (Estado{idx})\n'
    f' Tsat = {Tsat_C:.2f} °C (Tsat{idx})\n'
    f' hf = {hf:.2f} kJ/kg (Hf{idx})\n'
    f' hg = {hg:.2f} kJ/kg (Hg{idx})\n\n'
)

h_prev = h_kJ

resultado_label.config(text=resultados + "\n✓ Entalpías calculadas y guardadas.")

# ◆ Aquí llamamos a la función de graficado
mostrar_mollier_popup()

# Recalcular fórmulas JSON automáticamente
if auto_formulas:
    evaluate_auto_formulas(show_message=False)

except Exception as e:
    resultado_label.config(text=f"Error: {e}")

```

```
tk.Button(ent_win, text="Calcular Entalpías y Guardar", command=calcular_entalpias,  
bg="lightblue", width=24).pack(pady=5)
```

```
def mostrar_mollier_popup():
```

```
    try:
```

```
        # Crear ventana nueva
```

```
        mollier_win = tk.Toplevel(ventana)
```

```
        mollier_win.title("Diagrama de Mollier R134a")
```

```
        mollier_win.geometry("800x600")
```

```
        # Preparar datos del ciclo
```

```
        h_values = []
```

```
        P_values = []
```

```
        iso_flags_vals = []
```

```
        for i in range(1,5):
```

```
            H = global_vars.get(f"H{i}")
```

```
            P_entry = entradas[i-1][0].get() if i-1 < len(entradas) else None
```

```
            iso_flag = iso_flags[i-1].get() if i-1 < len(iso_flags) else 0
```

```
            if H is not None and P_entry:
```

```
                h_values.append(H)
```

```
                P_values.append(float(P_entry))
```

```
                iso_flags_vals.append(iso_flag)
```

```
        if len(h_values) < 2:
```

```
    messagebox.showwarning("Mollier", "No hay suficientes datos para graficar.")

    return

# ◆ Repetir el primer punto al final para cerrar el ciclo

h_plot = h_values + [h_values[0]]

P_plot = P_values + [P_values[0]]

# Crear figura y eje

fig, ax = plt.subplots(figsize=(7,5))

# =====

# ◆ Dibujar la campana de saturación

# =====

import CoolProp.CoolProp as CP

refrigerante = "R134a"

T_min = CP.PropsSI("Tmin", refrigerante)

T_max = CP.PropsSI("Tcrit", refrigerante)

T_vals = np.linspace(T_min+1, T_max-0.1, 500) # evitar extremos exactos

h_liq = []

h_vap = []
```

```
P_sat = []
```

```
for T in T_vals:
```

```
    P = CP.PropsSI("P","T",T,"Q",0,refrigerante) / 1000 # kPa
```

```
    hL = CP.PropsSI("H","T",T,"Q",0,refrigerante) / 1000 # kJ/kg
```

```
    hV = CP.PropsSI("H","T",T,"Q",1,refrigerante) / 1000
```

```
    P_sat.append(P)
```

```
    h_liq.append(hL)
```

```
    h_vap.append(hV)
```

```
# Rellenar la campana
```

```
ax.fill_betweenx(P_sat, h_liq, h_vap, color="lightblue", alpha=0.5, label="Campana de saturación")
```

```
# =====
```

```
# ◆ Dibujar el ciclo
```

```
# =====
```

```
ax.plot(h_plot, P_plot, '-', color='black', linewidth=2, label="Proceso R134a")
```

```
for h, P, iso, idx in zip(h_values, P_values, iso_flags_vals, range(1,len(h_values)+1)):
```

```
    color = 'blue' if iso else 'red'
```

```
    ax.plot(h, P, 'o', color=color, markersize=8)
```

```
    ax.text(h, P, f'P{idx}', fontsize=10, ha='right', va='bottom')
```

```
# Etiquetas y estilo

ax.set_xlabel("Entalpía h (kJ/kg)")

ax.set_ylabel("Presión P (kPa)")

ax.set_title("Diagrama de Mollier R134a (P vs h)")

ax.grid(True)

ax.set_yscale('log')

ax.legend()

# Integrar figura en Tkinter

canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=mollier_win)

canvas.get_tk_widget().pack(fill="both", expand=True)

canvas.draw()

except Exception as e:

    messagebox.showerror("Error Mollier", f"No se pudo generar el gráfico:\n{e}")

def abrir_propiedades_r134a():

    prop_win = tk.Toplevel(ventana)

    prop_win.title("Propiedades del R134a (Monofase)")

    prop_win.geometry("420x400")

    tk.Label(prop_win, text="Ingrese presión (kPa) y temperatura (°C):", font=("Arial", 12,

"bold")).pack(pady=5)
```

```
frameP = tk.Frame(prop_win)

frameP.pack(pady=3)

tk.Label(frameP, text="Presión (kPa):").pack(side="left", padx=5)

pres_entry = tk.Entry(frameP, width=10)

pres_entry.pack(side="left")

frameT = tk.Frame(prop_win)

frameT.pack(pady=3)

tk.Label(frameT, text="Temperatura (°C):").pack(side="left", padx=5)

temp_entry = tk.Entry(frameT, width=10)

temp_entry.pack(side="left")

resultado_label = tk.Label(prop_win, text="", justify="left", font=("Arial", 10))

resultado_label.pack(pady=10)

def calcular_propiedades():

    try:

        P_Pa = float(pres_entry.get()) * 1000

        T_K = float(temp_entry.get()) + 273.15

        rho = CP.PropsSI('D','T',T_K,'P',P_Pa,'R134a')

        mu = CP.PropsSI('V','T',T_K,'P',P_Pa,'R134a')

        cp = CP.PropsSI('C','T',T_K,'P',P_Pa,'R134a')

        k = CP.PropsSI('L','T',T_K,'P',P_Pa,'R134a')
```

$$pr = (cp \cdot \mu) / k$$

```
resultado = (  
    f"Densidad: {rho:.2f} kg/m³\n"  
    f"Viscosidad: {mu:.6e} Pa·s\n"  
    f"Calor específico: {cp:.2f} J/kg·K\n"  
    f"Conductividad: {k:.4f} W/m·K\n"  
    f"Prandtl: {pr:.4f}"  
)
```

```
updates = {  
    "Densidad_R134a": rho, "densidad_r134a": rho,  
    "Viscosidad_R134a": mu, "viscosidad_r134a": mu,  
    "Cp_R134a": cp, "cp_r134a": cp,  
    "Conductividad_R134a": k, "conductividad_r134a": k,  
    "Prandtl_R134a": pr, "prandtl_r134a": pr  
}  
  
global_vars.update(updates)  
  
# tambien guardar saneados  
  
for k, v in updates.items():  
    global_vars[sanitize_name(k)] = v
```

```
resultado_label.config(text=resultado + "\n\n✓ Propiedades del R134a guardadas exitosamente.")
```

```
# Recalcular fórmulas JSON (si las hay)
```

```
if auto_formulas:
```

```
    evaluate_auto_formulas(show_message=False)
```

```
except Exception as e:
```

```
    resultado_label.config(text=f"Error: {e}")
```

```
tk.Button(prop_win, text="Calcular y Guardar", command=calcular_propiedades, bg="lightblue", width=18).pack(pady=5)
```

```
def abrir_propiedades_r134a_bifasico():
```

```
    """Ventana para calcular propiedades bifásicas del R134a"""
```

```
def calcular_propiedades():
```

```
    try:
```

```
        # Lectura de entradas
```

```
        P_kPa = float(entry_presion.get())
```

```
        T_C = float(entry_temp.get())
```

```
        fluid = "R134a"
```

```
        # Conversión de unidades
```

```
        P_Pa = P_kPa * 1000
```

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{C}} + 273.15$$

# --- Líquido saturado (Q=0)

$$h_{\text{l}} = \text{PropsSI}(\text{'Hmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid}) / 1000 \quad \# \text{-> kJ/kg}$$

$$\rho_{\text{l}} = \text{PropsSI}(\text{'Dmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid})$$

$$\mu_{\text{l}} = \text{PropsSI}(\text{'V'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid})$$

$$k_{\text{l}} = \text{PropsSI}(\text{'L'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid})$$

$$cp_{\text{l}} = \text{PropsSI}(\text{'Cpmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid}) / 1000 \quad \# \text{-> kJ/kg}\cdot\text{K}$$

# --- Vapor saturado (Q=1)

$$h_{\text{v}} = \text{PropsSI}(\text{'Hmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 1, \text{fluid}) / 1000 \quad \# \text{-> kJ/kg}$$

$$\rho_{\text{v}} = \text{PropsSI}(\text{'Dmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 1, \text{fluid})$$

$$\mu_{\text{v}} = \text{PropsSI}(\text{'V'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 1, \text{fluid})$$

$$k_{\text{v}} = \text{PropsSI}(\text{'L'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 1, \text{fluid})$$

$$cp_{\text{v}} = \text{PropsSI}(\text{'Cpmass'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 1, \text{fluid}) / 1000 \quad \# \text{-> kJ/kg}\cdot\text{K}$$

# --- Calor latente (en kJ/kg)

$$h_{\text{fg}} = h_{\text{v}} - h_{\text{l}}$$

# --- Tensión superficial (si está disponible)

try:

$$\sigma = \text{PropsSI}(\text{'surface\_tension'}, \text{'T'}, T_{\text{sat}}, \text{'Q'}, 0, \text{fluid})$$

except:

$$\sigma = \text{None}$$

```
# Normalizar a float (evita errores en fórmulas)

def safe_float(x):

    try:

        return float(x)

    except:

        return 0.0

# Guardar en global_vars como floats (ya en kJ/kg)

global_vars.update({

    "P_R134a_bifasico_kPa": safe_float(P_kPa),

    "T_R134a_bifasico_C": safe_float(T_C),

    "h_l": safe_float(h_l),

    "rho_l": safe_float(rho_l),

    "mu_l": safe_float(mu_l),

    "k_l": safe_float(k_l),

    "cp_l": safe_float(cp_l),

    "h_v": safe_float(h_v),

    "rho_v": safe_float(rho_v),

    "mu_v": safe_float(mu_v),

    "k_v": safe_float(k_v),

    "cp_v": safe_float(cp_v),

    "h_fg": safe_float(h_fg),

    "sigma": safe_float(sigma),
```

})

# Mostrar resultados

resultado = f''''

Propiedades R134a (Bifásico)

-----

Presión: {P\_kPa:.2f} kPa

Temperatura: {T\_C:.2f} °C

--- Líquido Saturado ---

$h_l = \{h_l:.2f\}$  kJ/kg

$\rho_l = \{\rho_l:.2f\}$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu_l = \{\mu_l:.6f\}$  Pa·s

$k_l = \{k_l:.4f\}$  W/m·K

$cp_l = \{cp_l:.3f\}$  kJ/kg·K

--- Vapor Saturado ---

$h_v = \{h_v:.2f\}$  kJ/kg

$\rho_v = \{\rho_v:.2f\}$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu_v = \{\mu_v:.6f\}$  Pa·s

$k_v = \{k_v:.4f\}$  W/m·K

$cp_v = \{cp_v:.3f\}$  kJ/kg·K

Calor latente: {h\_fg:.2f} kJ/kg

```
Tensión superficial: {sigma if sigma else "No disponible"}
```

```
"""
```

```
    messagebox.showinfo("Resultados", resultado)
```

```
except Exception as e:
```

```
    messagebox.showerror("Error", f'Ocurrió un error: {e}')
```

```
# --- Crear ventana emergente ---
```

```
win = tk.Toplevel()
```

```
win.title("Propiedades R134a (Bifásico)")
```

```
win.geometry("330x200")
```

```
tk.Label(win, text="Presión de baja [kPa]:").pack(pady=5)
```

```
entry_presion = tk.Entry(win)
```

```
entry_presion.pack(pady=5)
```

```
tk.Label(win, text="Temperatura [°C]:").pack(pady=5)
```

```
entry_temp = tk.Entry(win)
```

```
entry_temp.pack(pady=5)
```

```
        tk.Button(win, text="Calcular", command=calcular_propiedades,  
bg="lightblue").pack(pady=10)
```

```
# =====
```

```
def calcular_LMTD(vars):
```

```
    Tc_in = vars.get("Tsat1")    # Refrigerante entrada
```

```
    Tc_out = vars.get("T[4]")    # Refrigerante salida
```

```
    Th_inagua = vars.get("Tent_agua")    # Agua entrada
```

```
    Th_magua = vars.get("Temperatura_media_agua")    # Temperatura media agua
```

```
    entrada
```

```
    Th_out = vars.get("Tsal_agua")    # Agua salida
```

```
    modo = vars.get("Modo_Flujo", "Contraflujo or Paralelo") # "Contraflujo" o "Paralelo"
```

```
    if None in (Tc_in, Tc_out, Th_inagua, Th_magua, Th_out):
```

```
        return None
```

```
    if modo == "Contraflujo":
```

```
        dT1 = Th_inagua - Tc_out
```

```
        dT2 = Th_magua - Tc_in
```

```
    else: # Paralelo
```

```
        dT1 = Th_magua - Tc_in
```

```
        dT2 = Th_out - Tc_out
```

```
    if dT1 <= 0 or dT2 <= 0:
```

```
        return None
```

```
return (dT1 - dT2) / math.log(dT1 / dT2)

# ----- Traductor de errores -----

def traducir_error(nombre, error):

    s = str(error).lower()

    if "not defined" in s or "nameerror" in s:

        return f"⚠ La variable {nombre} no se definió. Verifique que haya ingresado las lecturas
/ propiedades necesarias."

    elif "unsupported operand type" in s or "typeerror" in s:

        return f"⚠ La fórmula de {nombre} tiene valores no numéricos (texto en lugar de
números)."

    elif "none" in s:

        return f"⚠ La variable {nombre} no pudo calcularse porque faltan propiedades previas
o datos."

    elif "bad operand type" in s:

        return f"⚠ La fórmula de {nombre} está usando un tipo de dato incorrecto (texto en
lugar de número)."

    else:

        return f"⚠ Error en {nombre}: {error}"

# ----- Mostrar formulas JSON en ventana -----

def mostrar_formulas_json():

    # asegurar propiedades del agua antes de evaluar
```

```
ensure_propiedades_agua()

# decidir si necesitamos propiedades R134a para estas fórmulas
need_r134a = False

for k in auto_formulas.keys():

    if "r134a" in k.lower() or k.startswith("H") or k.startswith("Tsat") or "Reynolds_R134a"
in k:

        need_r134a = True

        break

if need_r134a:

    ok = ensure_propiedades_r134a()

    if not ok:

        return # abortar si faltan propiedades

# ◆ Calcular LMTD antes de evaluar fórmulas

lmt_d_val = calcular_LMTD(global_vars)

if lmt_d_val is not None:

    global_vars["LMTD"] = lmt_d_val

    global_vars["lmt_d"] = lmt_d_val # versión saneada

# ◆ Usar el nuevo evaluador

resultados = calcular_resultados(auto_formulas, global_vars)
```

```
if not resultados:

    messagebox.showinfo("Resultados", "No se encontraron fórmulas.")

    return

# Separar los errores de los resultados correctos

errores = []

for nombre, val in resultados.items():

    if isinstance(val, str) and val.startswith("Error"):

        errores.append(traducir_error(nombre, val))

    elif val is None:

        errores.append(f"⚠ La variable {nombre} no pudo calcularse (dato faltante).")

if errores:

    # Mostrar ventana con los errores traducidos

    win_err = tk.Toplevel(ventana)

    win_err.title("Errores en los cálculos")

    win_err.geometry("600x420")

    tk.Label(win_err, text="Se encontraron errores en los cálculos:", font=("Arial", 12,
"bold"), fg="red").pack(pady=10)

    frame_texto = tk.Frame(win_err)
```

```
frame_texto.pack(fill="both", expand=True, padx=10, pady=10)

scrollbar = tk.Scrollbar(frame_texto)
scrollbar.pack(side="right", fill="y")

texto = tk.Text(frame_texto, wrap="word", yscrollcommand=scrollbar.set,
font=("Consolas", 11))
texto.pack(fill="both", expand=True)
scrollbar.config(command=texto.yview)

for err in errores:
    texto.insert("end", f"{err}\n\n")

texto.config(state="disabled")

return # ♦ No muestra resultados si hay errores

# Si no hubo errores, mostrar resultados normalmente
win = tk.Toplevel(ventana)
win.title("Resultados de Cálculos")
win.geometry("600x420")

tk.Label(win, text="Resultados de las fórmulas:", font=("Arial", 12,
"bold")).pack(pady=10)
```

```
frame_texto = tk.Frame(win)

frame_texto.pack(fill="both", expand=True, padx=10, pady=10)

scrollbar = tk.Scrollbar(frame_texto)

scrollbar.pack(side="right", fill="y")

        texto = tk.Text(frame_texto, wrap="word", yscrollcommand=scrollbar.set,
font=("Consolas", 11))

        texto.pack(fill="both", expand=True)

        scrollbar.config(command=texto.yview)

for key, val in resultados.items():

        units = auto_formulas.get(key, {}).get("units", "")

        texto.insert("end", f"{key} = {val} [{units}]\n")

        texto.config(state="disabled")

# ----- INTERFAZ -----

ventana = tk.Tk()

ventana.title("BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR TUBOS
CONCENTRICOS")

ventana.geometry("1000x700")

# ----- Label modo de flujo -----
```

```
modo_flujo="Paralelo"

label_modo=tk.Label(ventana,text=f"Modo de flujo: {modo_flujo}",font=("Arial",12))

label_modo.pack(pady=5)

def cambiar_modo():

    global modo_flujo

    modo_flujo = "Contraflujo" if modo_flujo=="Paralelo" else "Paralelo"

    label_modo.config(text=f"Modo de flujo: {modo_flujo}")

# ◆ Guardar en global_vars

global_vars["Modo_Flujo"] = modo_flujo

global_vars["modo_flujo"] = modo_flujo # versión saneada

# ----- Menú desplegable lateral -----

frame_left = tk.Frame(ventana)

frame_left.pack(side="left", fill="y", padx=10, pady=10)

tk.Label(frame_left, text="Menú de acciones:", font=("Arial", 10, "bold")).pack(pady=5)

acciones = {

    # --- Separador: Adquisición y configuración ---

    "——— Adquisición y configuración ——": None,

    "Lectura de Sensores": abrir_lectura_sensores,

    "Cambiar modo de flujo": cambiar_modo,
```

```
"Recargar config JSON": lambda: (
    load_config(),
    load_auto_formulas(),
    messagebox.showinfo("OK", "Configuración y fórmulas recargadas")
),

# --- Separador: Propiedades termodinámicas ---
"—— Propiedades termodinámicas ——": None,
"Propiedades del Agua": abrir_propiedades_agua,
"Propiedades del R134a (Monofase)": abrir_propiedades_r134a,
"Propiedades del R134a (Bifásico)": abrir_propiedades_r134a_bifasico,
"Entalpía R134a": abrir_entalpia_r134a,
"Mostrar Diagrama de Mollier": mostrar_mollier_popup,

# --- Separador: Cálculos ---
"—— Cálculos ——": None,
"Calcular Fórmulas": mostrar_formulas_json,
"Ejecutar Formulas JSON": lambda: evaluate_auto_formulas(show_message=True),

# --- Separador: Gestión de datos ---
"—— Gestión de datos ——": None,
"Guardar Manual": guardar_manual,
"Limpiar Datos": limpiar_datos,
```

```
# --- Separador: Sistema ---  
"----- Sistema -----": None,  
"Salir": salir  
}  
  
# Crear combobox  
combo_acciones = ttk.Combobox(  
    frame_left,  
    values=list(acciones.keys()),  
    state="readonly",  
    width=35  
)  
combo_acciones.pack(pady=5)  
combo_acciones.current(0)  
  
# Botón ejecutar con control de separadores  
def ejecutar_accion():  
    seleccion = combo_acciones.get()  
    accion = acciones.get(seleccion)  
    if accion is None:  
        messagebox.showinfo("Info", "Seleccione una acción válida del menú.")  
    else:  
        accion()
```

```
tk.Button(  
    frame_left,  
    text="Ejecutar",  
    command=ejecutar_accion,  
    bg="lightblue",  
    width=24  
).pack(pady=5)  
  
# ----- Panel inferior izquierdo: Variables Globales -----  
frame_vars = tk.Frame(frame_left, relief="groove", borderwidth=2)  
frame_vars.pack(side="bottom", fill="x", pady=10)  
  
tk.Label(frame_vars, text="Variables Globales:", font=("Arial", 9,  
"bold")).pack(anchor="w", padx=5, pady=3)  
  
text_vars = tk.Text(frame_vars, height=25, width=50, wrap="none", font=("Consolas", 9))  
text_vars.pack(fill="both", padx=5, pady=5)  
scroll_vars = tk.Scrollbar(frame_vars, command=text_vars.yview)  
scroll_vars.pack(side="right", fill="y")  
text_vars.config(yscrollcommand=scroll_vars.set)  
  
def actualizar_panel_global_vars():  
    text_vars.config(state="normal")  
    text_vars.delete("1.0", tk.END)
```

```
if not global_vars:

    text_vars.insert(tk.END, "No hay variables cargadas.\n")

else:

    for k, v in sorted(global_vars.items()):

        text_vars.insert(tk.END, f"{k:25} = {v}\n")

text_vars.config(state="disabled")

ventana.after(3000, actualizar_panel_global_vars) # se actualiza cada 3 segundos

actualizar_panel_global_vars()

# ----- Gráfico y selección de sensor -----

frame_main = tk.Frame(ventana)

frame_main.pack(side="right", expand=True, fill="both")

fig, ax = plt.subplots(figsize=(6,4))

canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=frame_main)

canvas.get_tk_widget().pack()

# Línea inicial (sensor 1)

linea, = ax.plot([], [], label="Sensor 1")

ax.set_title("Sensor 1 en Tiempo Real")

ax.set_xlabel("Tiempo (s)")

ax.set_ylabel("Temperatura (°C)")
```

```
# Combo para seleccionar sensor individual
```

```
combo = ttk.Combobox(frame_main, values=["Sensor 1","Sensor 2","Sensor 3","Sensor 4","Sensor 5"])
```

```
combo.current(0)
```

```
combo.pack(pady=5)
```

```
# Botón para mostrar todos los sensores
```

```
mostrar_todos_btn = tk.Button(frame_main, text="Mostrar todos los sensores",  
bg="lightgreen")
```

```
mostrar_todos_btn.pack(pady=5)
```

```
sensor_seleccionado = 1
```

```
modo_todos = False
```

```
def suavizar_lista(lista, ventana=10):
```

```
    if len(lista) < ventana: return lista
```

```
    suavizada = []
```

```
    for i in range(len(lista)):
```

```
        inicio = max(0, i - ventana + 1)
```

```
        valores = lista[inicio:i+1]
```

```
        promedio = sum(valores)/len(valores)
```

```
        suavizada.append(promedio)
```

```
    return suavizada
```

```
def seleccionar_sensor(event):

    global sensor_seleccionado, modo_todos

    sensor_seleccionado = int(combo.get().split()[1])

    ax.set_title(f'Sensor {sensor_seleccionado} en Tiempo Real')

    modo_todos = False

    canvas.draw()

combo.bind("<<ComboboxSelected>>", seleccionar_sensor)

def mostrar_todos_sensores():

    global modo_todos

    modo_todos = True

    ax.set_title("Todos los sensores en Tiempo Real")

    canvas.draw()

mostrar_todos_btn.config(command=mostrar_todos_sensores)

def actualizar_grafico():

    if modo_todos:

        ax.clear()

        colores = ["b", "g", "r", "c", "m"]

        for i in range(1,6):

            tiempos_lim = tiempos[-50:]

            valores_crudos = sensores[i][-50:]
```

```
    valores_suaves = suavizar_lista(valores_crudos)

    ax.plot(tiempos_lim, valores_suaves, colores[i-1], label=f"Sensor {i}")

ax.set_xlabel("Tiempo (s)")

ax.set_ylabel("Temperatura (°C)")

ax.legend()

ax.set_title("Todos los sensores en Tiempo Real")

else:

    tiempos_lim = tiempos[-50:]

    valores_crudos = sensores[sensor_seleccionado][-50:]

    valores_suaves = suavizar_lista(valores_crudos)

    linea.set_data(tiempos_lim, valores_suaves)

    ax.relim()

    ax.autoscale_view()

    ax.set_title(f"Sensor {sensor_seleccionado} en Tiempo Real")

    ax.set_xlabel("Tiempo (s)")

    ax.set_ylabel("Temperatura (°C)")

canvas.draw()

ventana.after(1000, actualizar_grafico)

# ----- Hilo de lectura -----

def leer_datos():

    global lote

    inicio=datetime.now()

    while True:
```

```
try:
    linea_arduino=arduino.readline().decode('utf-8').strip()
    if linea_arduino:
        partes=linea_arduino.split(",")
        if len(partes)==6:
            temps=list(map(float,partes[:5]))
            flujo=float(partes[5])
            timestamp=datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
            datos.append([timestamp]+temps+[flujo])
            tiempo_rel=(datetime.now()-inicio).total_seconds()
            tiempos.append(tiempo_rel)
            for i in range(5):
                sensores[i+1].append(temps[i])
except Exception as e:
    print("Error:",e)

# ----- Ejecutar -----
threading.Thread(target=leer_datos,daemon=True).start()
actualizar_grafico()
ventana.mainloop()
arduino.close()
```