

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza
del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM-UNSCH
con tecnología Arduino**

PRESENTADO POR:

Bach. Jhon Mike YARANGA ACORI

Para optar el título profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

ASESOR:

M.CS. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH

AYACUCHO – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por el apoyo incondicional durante la elaboración del presente trabajo.

AGRADECIMIENTO

A mi querida Alma Mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Química donde realicé mis estudios de formación profesional.

Mi sincero agradecimiento a los ingenieros Alejandro Tineo Morote y Aquiles López La Serna, quienes contribuyeron con su conocimiento y experiencia en el desarrollo del proyecto de investigación.

Un agradecimiento especial a mi asesor M.Cs. Abel Nilo Juscamayta Tomasevich, por su confianza y sus conocimientos brindados en la ejecución del presente trabajo.

Como un homenaje póstumo agradezco al Ing. Bernardo Enciso López, por sus consejos, su paciencia y por darme la oportunidad de poder trabajar con el intercambiador de calor tubo y coraza.

RESUMEN

El presente proyecto hace énfasis en: “Automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM - UNSCH con tecnología Arduino”, mediante dispositivos de control, como microcontroladores, logrando operar un sistema o proceso con la mínima intervención de ser humano. Para llevar a cabo el estudio se realizó el diagnóstico del intercambiador de calor, luego se determinó las variables de operación y finalmente se realizó el control automático. Las pruebas experimentales, así como el montaje del equipo se realizó en el Laboratorio de Transferencia de Masa y en taller mecánico de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Este equipo presenta un tanque, una resistencia de inmersión, una bomba tipo centrífuga, red de tuberías y accesorios en acero inoxidable ASTM 304, sensores LM35/transmisores de temperatura, válvulas tipo bola, un microcontrolador, y un supervisor - controlador HMI. El sistema de control automático PID se basa en controlar las principales variables del proceso: el caudal del fluido caliente y la temperatura de salida del intercambiador de calor, estas variables se muestran en tiempo real a través de un HMI (Interfaz Humano Máquina), desde donde se controla la temperatura deseada. Para la evaluación del intercambiador de calor se realizó pruebas experimentales en distintas condiciones estándar de operación en modo manual y automático con arreglo en flujo contracorriente y paralelo. El fluido utilizado en la evaluación fue agua-agua. De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación, el equipo opera dentro de los rangos de diseño según la bibliografía. Finalmente, se afirma que la investigación contribuye en el aprendizaje de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, brindando una ayuda didáctica en el estudio de la transferencia de calor, además, permite que el estudiante tenga una visión más amplia sobre conceptos relacionados a la automatización y control, y de los procesos que se pueden controlar en la industria.

ABSTRACT

This project emphasizes: "Automate the tube and shell heat exchanger of the FIQM - UNSCH heat transfer laboratory with Arduino technology", through control devices, such as microcontrollers, managing to operate a system or process with minimal intervention of being human. To carry out the study, the diagnosis of the heat exchanger was carried out, then the operating variables were determined and finally the automatic control was carried out. The experimental tests, as well as the assembly of the equipment, were carried out in the Mass Transfer Laboratory and in the mechanical workshop of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy of the National University of San Cristóbal of Huamanga. This equipment features a tank, an immersion heater, a centrifugal pump, ASTM 304 stainless steel piping and accessories, LM35 sensors/temperature transmitters, ball valves, a microcontroller, and an HMI supervisor-controller. The PID automatic control system is based on controlling the main variables of the process: the flow of the hot fluid and the outlet temperature of the heat exchanger, these variables are displayed in real time through an HMI (Human Machine Interface), from where the desired temperature is controlled. For the evaluation of the heat exchanger, experimental tests were carried out under different standard operating conditions in manual and automatic mode with countercurrent and parallel flow arrangements. The fluid used in the evaluation was water-water. According to the results obtained in the evaluation, the equipment operates within the design ranges according to the bibliography. Finally, it is stated that the research contributes to the learning of the students of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy, providing a didactic aid in the study of heat transfer, in addition, it allows the student to have a broader vision of related concepts. to automation and control, and of the processes that can be controlled in the industry.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
GLOSARIO	xi
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción del problema	14
1.2. Formulación del problema	14
1.2.1. Problema general	14
1.2.2. Problema específico	15
1.3. Objetivos de la investigación	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivo específico	15
1.4. Justificación	15
1.4.1. Técnica	15
1.4.2. Económica	15
1.4.3. Educativa	16
1.5. Delimitaciones del problema	16
1.5.1. Espacial	16
1.5.2. Temporal	16
1.6. Hipótesis	16
1.6.1. Hipótesis general	16
1.6.2. Hipótesis específicas	16
CAPÍTULO II	17
MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes de la investigación	17
2.1.1. A nivel local	17
2.1.2. A nivel nacional	17
2.1.3. A nivel internacional	18
2.2. Bases teóricas	19
2.2.1. Intercambiador de calor	19

2.2.1. Intercambiador de calor de coraza y tubos	19
2.2.2. Diseño para intercambiador de calor de coraza y tubos	20
2.2.3. Control	25
2.2.4. Automatización	33
2.3. Marco conceptual	35
2.3.1. Arduino.....	35
2.3.2. Microcontroladores	36
2.3.3. Sensores.....	36
2.3.4. Variables de proceso.....	37
2.4. Marco legal	38
CAPÍTULO III	40
DISEÑO METODOLÓGICO	40
3.1. Tipo de investigación.....	40
3.2. Nivel de investigación.....	40
3.3. Población y muestra	40
3.4. Técnicas de recolección de datos	41
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	41
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	41
3.5. Materiales y equipos.....	41
3.5.1. Intercambiador de calor de tubo y coraza.....	41
3.5.2. Componentes para la automatización.....	41
3.6. Diseño de la investigación.....	45
CAPÍTULO IV.....	47
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1. Intercambiador de calor tubo y coraza.....	47
4.2. Diseño del sistema de control automático	48
4.3. Operación del intercambiador de calor	52
4.3.1. Modo Manual	52
4.3.2. Modo Automático.....	52
4.3.3. Intercambiador de calor tubo y coraza.....	55
4.4. Discusión	60
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	64
ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de los sensores.....	37
Tabla 2 Características del intercambiador de calor	56
Tabla 3 Datos de temperatura del intercambiador de tubo y coraza	56
Tabla 4 Propiedades del fluido, agua (H ₂ O)	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Intercambiador de calor de coraza y tubos.....	20
Figura 2 Diagrama para el diseño del intercambiador de calor tubo y coraza.....	22
Figura 3 Factor de transferencia de calor para el lado del casco.....	25
Figura 4 Control de nivel en lazo abierto y lazo cerrado.....	27
Figura 5 Proceso relacionando a un intercambiador de calor	28
Figura 6 Control proporcional	30
Figura 7 Respuesta a un escalón del controlador PI	31
Figura 8 Control proporcional, integral y derivado	32
Figura 9 Elementos de un sistema automatizado	34
Figura 10 Placa Arduino Mega	35
Figura 11 Intercambiador de calor de tubo y coraza	41
Figura 12 Bomba centrífuga	42
Figura 13 Resistencia de inmersión	42
Figura 14 Sensores de temperatura.....	43
Figura 15 Sensor de caudal.....	43
Figura 16 Sensor de nivel.....	44
Figura 17 Arduino mega 2560	44
Figura 18 Diagrama de flujo del diseño de investigación	46
Figura 19 Equipo de intercambiador de calor tubo y coraza	48
Figura 20 Diagrama esquemático del control automático.....	49
Figura 21 Plano P&ID del intercambiador de calor.....	49
Figura 22 Pantalla LCD con el valor de set point deseado.....	50
Figura 23 Secuencia para realizar la lógica de programación.....	51
Figura 24 Algoritmo para el funcionamiento automático.....	53
Figura 25 Diagramas de control automático	54
Figura 27 Perfil de temperatura en flujo contracorriente.....	57

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Propiedades del agua líquida (SI).....	66
Anexo 2 Evaluación del intercambiador de calor tubo y coraza.....	66
Anexo 3 Cálculos realizados en la evaluación del intercambiador de calor.....	69
Anexo 4 Modelamiento del controlador.....	82
Anexo 6 Código de diseño.....	84
Anexo 6 Diagrama del tablero de mando del intercambiador de calor.....	94
Anexo 7 Panel fotográfico.....	95

GLOSARIO

Automatización	Consiste de un sistema de control automático, por el cual el sistema verifica su propio funcionamiento, efectuando mediciones y correcciones sin la interferencia del ser humano.
Control	Acción ejercida con el fin de poder mantener una variable dentro de un rango de valores predeterminados.
Controladores	Es aquel instrumento que compara el valor medido con el valor deseado, en base a esta operación calcula un error, para luego actuar con el fin de corregir el error.
Control automático	Es el desarrollo de la acción de control, sin la participación directa de un ser humano (operario).
Exactitud	Es la capacidad del instrumento de medición de dar indicaciones que se aproximen al valor verdadero de la magnitud medida.
Error	Es la diferencia entre la salida real y la salida ideal, el error se puede expresar como un porcentaje de la lectura.
Indicadores	Poseen una escala para expresar la equivalencia de los datos al operario, puede ser manómetros, tensiómetros, entre otros.
Instrumentación	Es el conjunto de ciencias y tecnologías mediante las cuales se miden cantidades físicas o químicas con el objeto de obtener información para su archivo, evaluación o actuación sobre los sistemas de control automático
Linealidad	Es la característica que define que tanto se acerca la curva de calibración del instrumento a una línea recta.
Modelo matemático	Nos brindan los medios de capturar el comportamiento de un sistema sujeto a condiciones iniciales, entradas de control y perturbaciones mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas.

Operaciones de control	Conjunto de acciones que buscan mantener una variable dentro de patrones de funcionamiento deseados.
Precisión	Capacidad de un instrumento de entregar el mismo valor para la magnitud medida al realizar varias mediciones y en unas mismas condiciones.
Rango	Se define como el intervalo comprendido entre el valor mínimo y máximo que el instrumento puede medir, transmitir o indicar.
Señal	Es aquella muestra física que puede ser medida ya sea variable o constante en el tiempo
Sistema de automatización	Conjunto de equipos, sistemas de información, y procedimientos que van a permitir asegurar un desempeño independiente del proceso, a través de operaciones de control y supervisión.
Sistema de control	Conjunto de equipos y componentes, que van a permitir llevar a cabo las operaciones de control.
Sistemas de medición	Conjunto de elementos que forman un instrumento, capaz de convertir una variable física a una señal.
Supervisión y monitoreo	Es el proceso de lectura de valores de las diversas variables del proceso, con el objetivo de identificar el estado en el que se viene desarrollando el proceso en un tiempo actual.
Transductores	Reciben una señal de entrada en función a una o más cantidades físicas y la convierten modificada a una señal de salida.
Transmisor	En el campo de la instrumentación y control es un equipo que emite una señal, código mensaje a través de un medio que está conectado al sensor mediante conductores eléctricos.

INTRODUCCIÓN

El avance en la teoría y la práctica del área de control automático es muy importante, porque brindan los medios necesarios lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, abaratan los costos de producción, mejoran la calidad y liberan al operador de rutinas manuales como el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc., Pérez (2008) menciona que “es importante destacar que, con la ayuda de los procesos industriales automatizados, se aumenta la eficiencia de la producción de bienes y aumentan los índices de competitividad que les ayuda a estar a la vanguardia con las actuales tendencias de la globalización” (p. 82).

La tesis titulada: “Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM - UNSCH con tecnología Arduino” propone automatizar el intercambiador de calor mediante la tecnología de Arduino, controlando las principales variables del proceso caudal y temperatura, estos valores de las variables se podrá obtener en tiempo real mediante un HMI (Interfaz Humano-Máquina) y SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), donde se podrá controlar la temperatura deseada a la salida del intercambiador de calor.

La Tesis se divide en cuatro capítulos en los cuales el capítulo I, habla sobre el planteamiento del problema de investigación, el capítulo II se encuentra el marco teórico, en la cual se basa la investigación, el capítulo III es el diseño metodológico, el capítulo IV se analiza los resultados y la discusión respectiva, finalmente, se tiene las conclusiones y las recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Cualquier proceso ya sea a nivel de laboratorio o industrial está expuesto a errores humanos y una de las maneras de reducir estos errores es introduciendo sistemas electrónicos como: sensores, actuadores, microcontroladores, etc., que permiten la toma y el procesamiento de datos, reduciendo las equivocaciones del factor humano.

Dentro del laboratorio de transferencia calor de la UNSCH; está el intercambiador de calor tubo y coraza, como se muestra en la Figura A7 del Anexo 07, en la cual se realizaban prácticas de análisis y eficiencia de la transferencia de calor. El intercambiador estaba sobre un soporte en el cual se instalaba mangueras para la entrada de los fluidos, el fluido caliente era previamente obtenido de un equipo adicional para luego ser llevado al intercambiador, no se lograba medir el flujo del fluido caliente debido a su elevada temperatura, y para medir el caudal del fluido frío se usaba probeta y cronómetro. Para realizar las medidas de temperatura, tanto de la entrada como de la salida del intercambiador de calor se realizaba con termómetros digitales externos. Considerando estos antecedentes se propone automatizar el intercambiador de calor de tubo y coraza con tecnología Arduino. Esta propuesta está orientada a la automatización del equipo y una evaluación rápida y precisa.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuáles son los parámetros para automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza con tecnología Arduino?

1.2.2. Problema específico

- ¿Cuáles son las deficiencias que presenta el intercambiador para realizar la automatización con tecnología Arduino?
- ¿Cuáles son las principales variables de control para automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza?
- ¿Cómo lograr la automatización con tecnología Arduino del intercambiador de calor con los resultados del diagnóstico y obtención de datos en tiempo real?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM - UNSCH con tecnología Arduino.

1.3.2. Objetivo específico

- Diagnosticar el intercambiador de calor tubo y coraza para la automatización con tecnología Arduino.
- Determinar las principales variables de control para automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza.
- Evaluar y automatizar mediante la tecnología Arduino el intercambiador de calor con los resultados del diagnóstico y obtención de datos en tiempo real.

1.4. Justificación

1.4.1. Técnica

Se cuenta con experiencia y capacidad para automatizar utilizando tecnología Arduino. Así mismo esta técnica es sencilla y de aplicación, por su naturaleza de estar dentro del Software de código abierto.

1.4.2. Económica

Al automatizar el equipo nos ahorrara tiempo en la operación y menor consumo de energía eléctrica.

1.4.3. Educativa

Para facilitar el estudio de la transferencia de calor, el equipo automatizado está disponible en el Laboratorio de Transferencia de Calor, el cual tiene mejoras a comparación del equipo anterior. El intercambiador de calor cuenta con un sencillo HMI para facilitar las lecturas de temperatura y caudal en tiempo real, además, está implementado de con un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos SCADA para controlar la temperatura deseada a la salida del intercambiador de color tubo y coraza. El estudiante conocerá a detalle el funcionamiento de un intercambiador de calor, y sobre todo podrá profundizar en los sistemas de control y automatización.

1.5. Delimitaciones del problema

1.5.1. Espacial

Para el desarrollo de la presente investigación se usó los espacios del laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM – UNSCH, debido a que el equipo se encuentra en estas instalaciones y además de contar con la cercanía del Taller electromecánico Holger K. Hansen.

1.5.2. Temporal

El presente proyecto se realizó en el periodo del año académico 2022.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

- Al automatizar el intercambiador de calor tubo y coraza con tecnología Arduino, permite adquirir los datos en tiempo real mediante una interfaz hombre máquina y facilita el aprendizaje de los estudiantes.

1.6.2. Hipótesis específicas

- En el diagnóstico el intercambiador de calor, se logró conocer el estado de las variables a ser automatizas.
- Se determinó las variables principales de control para la automatización y control.
- La automatización mediante la tecnología Arduino de las principales evaluar las principales variables del intercambiador de calor tubo y coraza.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. A nivel local

En la tesis de Juan Carlos Terres León titulada "Elaboración de un software para el diseño de intercambiadores de calor" publicada en 2014 en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga en Perú tiene como objetivo crear un software fácil de usar para el diseño de intercambiadores de calor en el ambiente de Windows. Este software incluye formularios, módulos y DataReports diseñados en Visual Basic 6.0 para el cálculo térmico de los intercambiadores de calor. Se divide en dos etapas: la primera consiste en crear una base de datos en Access con propiedades físicas y características de los materiales, y la segunda consiste en construir la interfaz con el usuario y las rutinas de programación. El software está diseñado con métodos Kem y Chester & Jensen y se validó con datos de la bibliografía y hojas de especificación, mostrando un porcentaje de desviación menor al 30%. Se considera una herramienta valiosa para la enseñanza del diseño de intercambiadores de calor que permite una enseñanza más dinámica y más tiempo para el análisis e interpretación de problemas relacionados con el intercambio de calor.

2.1.2. A nivel nacional

En 2017, Darwin Fray Apaza Mamani e Irvin Jhons La Torre Javier de la Universidad Nacional del Altiplano publicaron su tesis titulada "Diseño e Implementación de un Sistema de Riego Automatizado Basado en Balance de Humedad del Suelo con Tecnología Arduino en el Laboratorio de Control y Automatización EPIME 2016". El objetivo fue diseñar e implementar un sistema de riego automatizado basado en el balance de humedad del suelo utilizando tecnología Arduino para el uso eficiente del

agua. Los autores mencionan que diseñaron e implementaron con éxito un sistema automatizado utilizando la tecnología Arduino para el uso eficiente del agua, el balance óptimo de humedad y el monitoreo de los valores de consumo de energía en el Laboratorio de Control y Automatización EPIME 2016.

El autor Marcos Prudencio Flores Sandoval, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo en Perú, publicó una tesis de pregrado titulada "Diseño de una mini planta intercambiadora de calor controlada por un sistema HMI/SCADA" en 2016. El objetivo es diseñar una planta pequeña para la formación de los estudiantes de ingeniería electrónica, utilizando un sistema HMI/SCADA para controlar el intercambiador de calor. La metodología incluye el uso de LabView para visualizar el funcionamiento del sistema de control. Al final, se concluye que el modelo de intercambiador de tubo y coraza es el más adecuado debido a su fácil accesibilidad para el mantenimiento.

2.1.3. A nivel internacional

Pablo Rubén Chicaiza Conchambay de la Universidad Politécnica Salesiana publicó una tesis de grado titulada "Automatización del intercambiador de calor de flujo líquido del laboratorio de termodinámica de la carrera de ingeniería mecánica" en Ecuador en 2014. Su objetivo es automatizar el intercambiador de calor de flujo líquido-líquido con dispositivos de control como microcontroladores, reduciendo la intervención humana. Para alcanzar este objetivo, se realiza un análisis del comportamiento y las condiciones de funcionamiento del equipo. Al final, se confirma la validez del estudio teórico y las pruebas realizadas muestran que los nuevos elementos funcionan correctamente. Además, la automatización en el laboratorio brinda una mejor ayuda didáctica en el estudio de la transferencia de calor y permite una comprensión más amplia de los conceptos básicos de la automatización y de los procesos controlables en la industria.

El informe "Automatización de la planta piloto intercambiador de calor" por Alejandro Alfredo Burbano Valencia, publicado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali en Colombia en 2015, tiene como objetivo proponer una estrategia de control automático para la planta piloto intercambiadora de calor. Para ello, el autor diseña una metodología que incluye la descripción de las variables del proceso, la obtención de datos, la elaboración de la estrategia de control, su implementación y evaluación, y la implementación del sistema de supervisión y pruebas. Al final, el autor menciona que el modelo analítico muestra una aproximación del comportamiento esperado en

la planta, mientras que el modelo experimental permite verificar el comportamiento real y cómo es afectado por factores no considerados en el modelo matemático.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten la transferencia de calor entre dos o más fluidos. Son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y domésticas, incluyendo plantas termoenergéticas, plantas químicas, sistemas de climatización, unidades de refrigeración, ingeniería ambiental, industria manufacturera, y más (Zohuri, 2017).

Uno de los intercambiadores de calor más usado en la industria es el intercambiador de calor de coraza y tubos. Serth (2007) menciona es un equipo “que suministra una cantidad de transferencia de calor relativamente elevada por unidad de volumen, es muy versátil y flexible, y puede ser diseñado para efectuar casi cualquier servicio de transferencia de calor” (pp. 126-158).

2.2.1. Intercambiador de calor de coraza y tubos

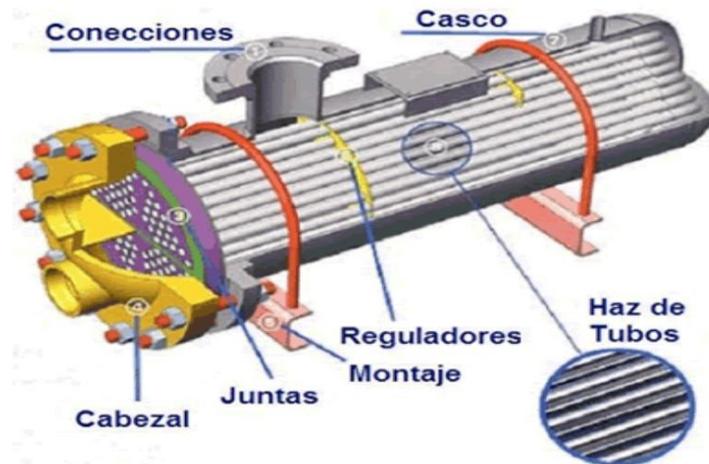
Los intercambiadores de calor con tubo y coraza son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales debido a su relación entre el área de transferencia de calor y el volumen y peso. Estos dispositivos pueden ser construidos con un área de transferencia de calor extensa en un tamaño relativamente pequeño. Además, pueden ser usados para calentar, enfriar y condensar/hacer hervir una amplia variedad de fluidos, ofreciendo gran flexibilidad en el cumplimiento de diferentes requerimientos de servicio. Los intercambiadores de calor con tubo y coraza también pueden ser diseñados para manejar fluidos a altas presiones y fluidos con diferentes presiones entre sí (Kakaç et al., 2012).

De acuerdo a Petirrin y Dare (2016), un intercambiador de calor de coraza y tubo consta de una estructura de coraza que actúa como recipiente a presión y un haz de tubos huecos ubicados dentro de ella. El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas se realiza mediante el contacto cercano de los mismos, pero se evita su mezcla a través de una barrera metálica (haz de tubos). Los deflectores o baffles en la coraza dirigen el flujo del fluido y brindan soporte a los

tubos, aumentando la turbulencia y la tasa de transferencia de calor. La Figura 1 muestra este tipo de equipo.

Figura 1

Intercambiador de calor tubo y coraza



Nota. Adaptado de diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos, (p. 24), por S. Burbano, 2014, Universidad santo Tomás.

La fabricación de los tubos para los intercambiadores de calor puede ser de diferentes aleaciones resistentes a la corrosión, incluyendo acero, aluminio-bronce, aceros inoxidable, entre otros. Los diámetros de los tubos deben cumplir con las especificaciones comerciales. El espaciado entre los tubos no debe ser muy estrecho, ya que puede debilitar la estructura de los cabezales. La configuración de los tubos puede ser triangular o cuadrada. Según Burbano (2014), una disposición triangular puede proporcionar una mayor transferencia de calor en el lado de la coraza, ya que puede resultar en coeficientes de transferencia de calor un 25% más altos que la disposición cuadrada bajo condiciones similares.

2.2.2. Diseño para intercambiador de calor de coraza y tubos

En el diseño de un intercambiador de calor se deben considerar ciertos requisitos esenciales. Primero, es necesario definir una unidad que sea técnicamente viable y que tenga la capacidad deseada. Esto incluye la determinación de una serie de parámetros geométricos, como la longitud, el diámetro y el espesor de los tubos, la disposición y el paso de los tubos, el espaciado de los deflectores, el diámetro de la coraza y el número de tubos, así como el número de pasos por los tubos y la coraza.

Algunos de estos parámetros pueden ser previamente establecidos mediante las especificaciones del proyecto o las preferencias y la experiencia del diseñador. Una vez que se han establecido estos parámetros, las características geométricas restantes se determinan mediante el método de diseño térmico que se utilice, seguido de un proceso de optimización que resulte en un costo mínimo o en un área mínima (Cao, 2010).

En el diseño de un intercambiador de calor, hay un equilibrio entre lograr una alta tasa de transferencia de calor y tener bajas disminuciones de presión en los fluidos, según Cao (2010).

La Figura 2 muestra el diagrama para el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubo.

En adelante, se presentan las fórmulas utilizadas en la elaboración de la concepción del intercambiador de calor de coraza y tubos por medio del método Kern.

Área de Transferencia

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_L F_t} \quad (2.1)$$

Delta de temperatura,

$$\Delta T_i = T_{i \text{ salida}} - T_{i \text{ entrada}} \quad (2.2)$$

Velocidad de transferencia neta de calor,

$$q_i = m_i \cdot C_p \cdot \Delta T_i \quad (2.3)$$

Diferencia de temperatura media logarítmica **LMTD** (Log Mean Temperature Difference)

$$LMTD = \Delta T_{\ln}$$

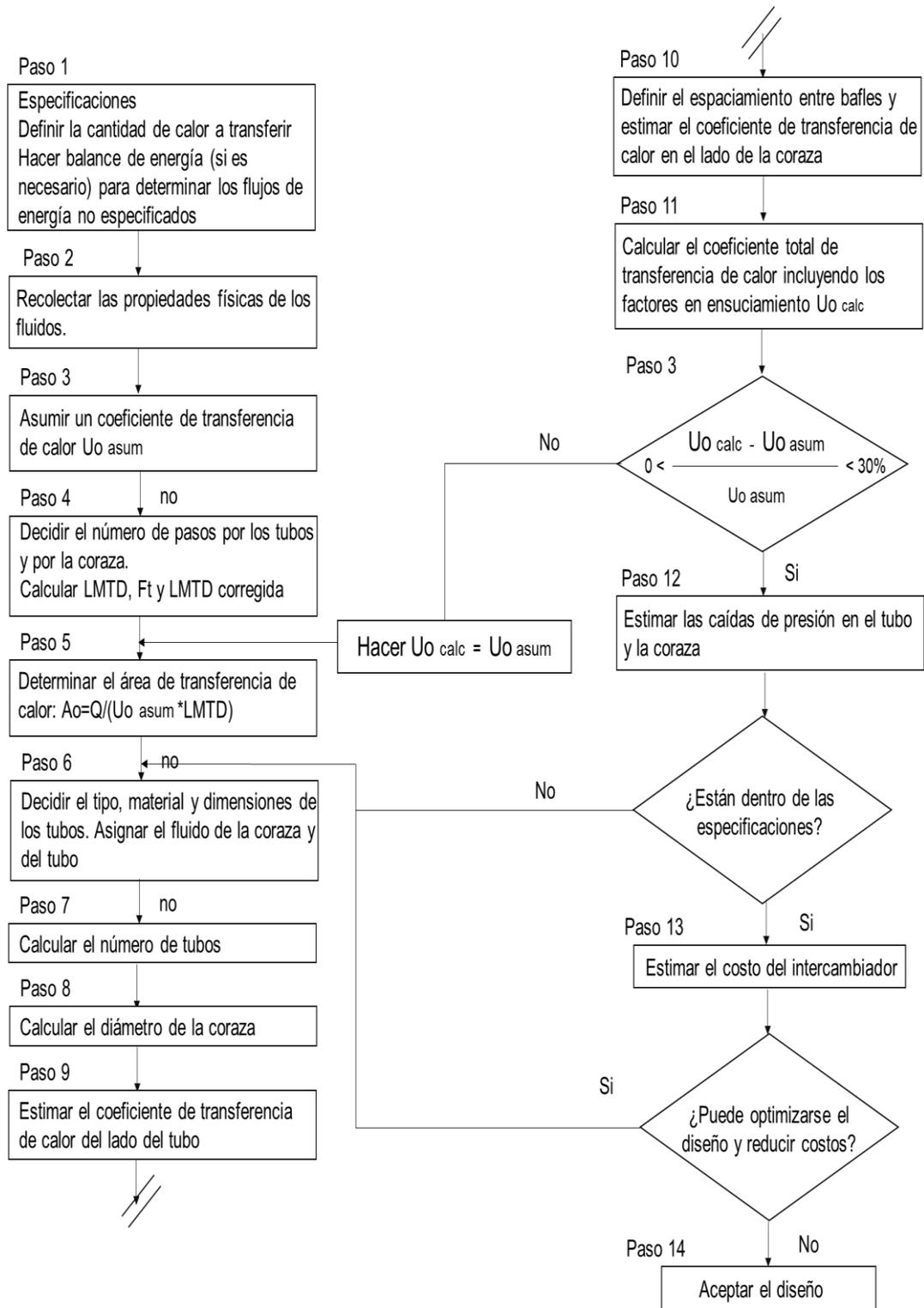
$$LMTD = \frac{(T_2 - T_{i \text{ salida}}) - (T_3 - T_{i \text{ entrada}})}{\ln \frac{(T_2 - T_{i \text{ salida}})}{(T_3 - T_{i \text{ entrada}})}} \quad (2.4)$$

Temperatura promedio de los tubos

$$T_{i \text{ prom}} = \frac{T_{i \text{ entrada}} + T_{i \text{ salida}}}{2} \quad (2.6)$$

Figura 2

Diagrama para el diseño del intercambiador de calor tubo y coraza



Nota. Tomado de *Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza*, (p. 3) por. M. Reyes et al, 2014, Ingeniería Mecánica.

Área de sección transversal de un tubo

$$a_t = \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad (2.7)$$

Área total de flujo

$$a_{tt} = Nt * a_t \quad (2.8)$$

Flujo de agua de calentamiento (kg/s)

$$m_i = \frac{Q_i}{C_p \Delta t} \quad (2.9)$$

Velocidad másica del agua (kg/s m²)

$$G_t = \frac{m_i}{a_{tt}} \quad (2.10)$$

Velocidad lineal (m/s)

$$v = \frac{G_t}{\rho} \quad (2.11)$$

Cálculo del coeficiente interior de agua en los tubos

$$h_i = 4200(1,35 + 0,02t)v_t^{0,8} / d_i^{0,2} \quad (2.12)$$

Coeficiente de película en el lado del casco

$$a_s = \frac{(P_t - d_o)D_s B}{P_t} \quad (2.13)$$

Flujo del agua fría (kg/s)

$$m_s = \frac{Q_i}{C_p \Delta t} \quad (2.14)$$

Velocidad másica del agua (kg/s m²)

$$G_s = \frac{m_s}{a_s} \quad (2.15)$$

Diámetro equivalente (m)

$$D_e = \frac{1,10}{d_o} (P_t^2 - 0,917d_o^2) \quad (2.16)$$

Reynolds

$$R_e = \frac{G_s D_s}{\mu} \quad (2.17)$$

Coefficiente de película para el lado del casco

$$h_s = J_{Hs} \left(\frac{k}{D_e} \right) R_e (P_r)^{1/3} \quad (2.18)$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + r_t \frac{d_o}{d_i} + \frac{x}{k} \frac{d_o}{D_m} + r_s + \frac{1}{h_s}} \quad (2.19)$$

Donde:

ρ_l = densidad del líquido (kg/m^3)

A = área (m^2)

T_i = temperatura de entrada y salida del componente i ($^{\circ}C$)

C_p = calor específico ($J / kg^{\circ}C$)

h_i = calor latente de vaporización ($W / m^2 \cdot ^{\circ}C$)

K = conductividad térmica del material ($W / m \cdot ^{\circ}C$)

μ = viscosidad del agua ($kg / m \cdot s$)

U = coeficiente global ($W / m^2 \cdot ^{\circ}C$)

x = espesor del tubo (mm)

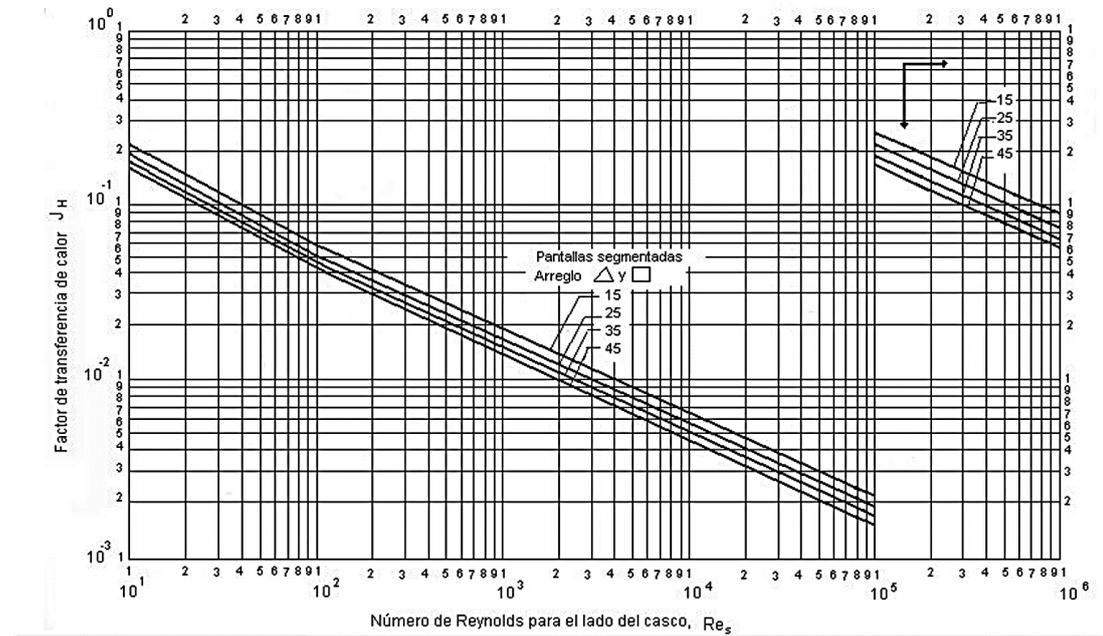
D_m = promedio de d_i y d_o (mm)

d_i = Diámetro interno del tubo interior (m)

d_o = Diámetro externo del tubo interior (m)

Figura 3

Factor de transferencia de calor para el lado del casco



Nota: Tomado de Intercambiador de calor, (p.70) por. L. Moncada, 2020, Universidad de Trujillo.

2.2.3. Control

Según Creus (2011), los instrumentos de medición y control son clave para regular las variables en los procesos industriales, tales como la presión, el caudal, la temperatura, el pH, entre otros, de manera más eficiente que un operador. Estos procesos pueden ser continuos o discontinuos y las variables se mantienen en un valor fijo o variable, o guardando una relación determinada con otra variable.

Ogata (2010) señala que las teorías de control más comúnmente utilizadas son la teoría clásica de control, también conocida como teoría convencional, la teoría moderna y la teoría robusta. La teoría de control moderna se enfoca en el estudio del tiempo de los sistemas de ecuaciones diferenciales.

La estabilidad del sistema depende del error entre el sistema real y su modelo. Esto significa que cuando el controlador diseñado basado en un modelo se aplica al sistema real, éste puede no ser estable. Para evitar esta situación, se diseña el sistema de control definiendo en primer lugar el rango de posibles errores y después diseñando el controlador de forma que, si el error del sistema está en dicho rango, el sistema de control diseñado permanezca

estable. El método de diseño basado en este principio se denomina teoría de control robusto. Esta teoría incorpora tanto la aproximación de respuesta en frecuencia como la del dominio temporal (p.325).

Según Mendiburu (2003), existen formas y técnicas que permiten representar los sistemas de control a través de funciones matemáticas, esta representación se conoce como modelamiento matemático. Este modelo describe las características dinámicas del sistema a través de ecuaciones diferenciales. El modelamiento matemático puede ser analítico, cuando se aplican las leyes físicas a cada componente del sistema y se combinan para formar una función matemática, o experimental, que implica identificar los parámetros mediante el análisis de datos de entrada y salida, estimando valores posibles que se ajusten al sistema (p.321).

Creus (2011) define:

El control es la acción o el efecto de poder decidir sobre el desarrollo de un proceso o sistema. También se puede entender como la forma de manipular ciertas variables para conseguir que ellas u otras variables actúen en la forma deseada. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado (p. 2).

Para que esta comparación y subsiguiente corrección sean posibles, el sistema de control debe incluir una unidad de medida y de control, un elemento final de control y el proceso en sí. Este conjunto forma un bucle o lazo conocido como lazo de control. El lazo puede ser abierto o bien cerrado.

2.2.3.1. Sistemas de control en lazo cerrado

Para Ogata (2010) son sistemas de control realimentados en donde:

Se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado, Figura 4 (p. 326).

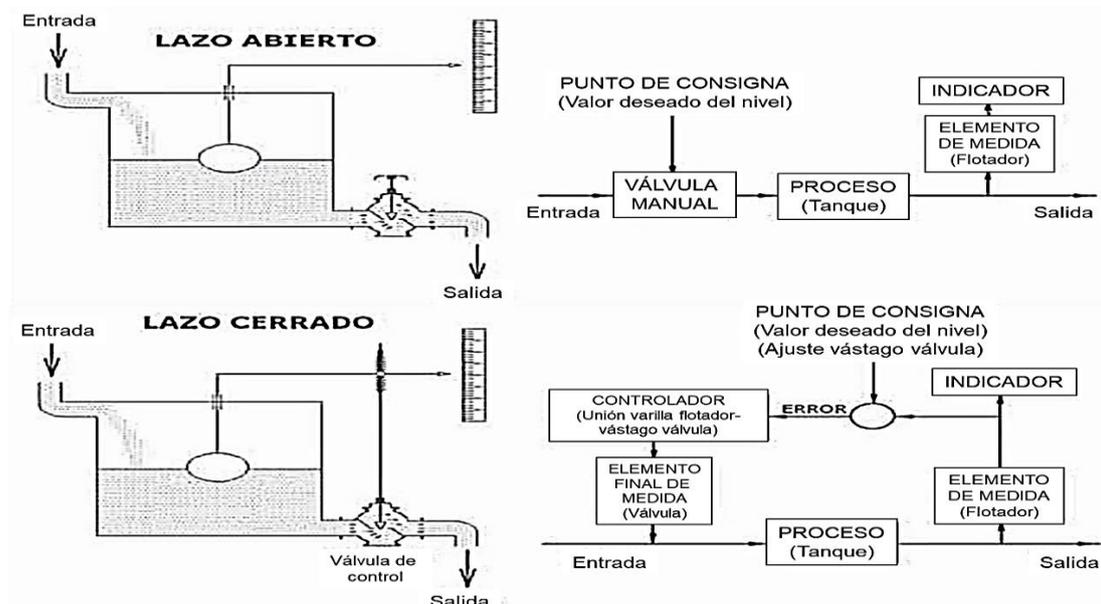
2.2.3.2. Sistemas de control en lazo abierto

Para Ogata (2010) son:

Son sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control, en otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. A cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada, Figura 4 (p. 326).

Figura 4

Control de nivel en lazo abierto y lazo cerrado



Nota: Tomado de *Instrumentación industrial*, (p. 2) por. A. Creus, 2011, Alfaomega.

2.2.3.3. Elementos de un sistema de control

Mendiburu (2003) menciona que:

Dependiendo del tipo de proceso industrial y la función de control requerida, los sistemas de control van desde lo más simples como mantener el nivel de agua o de temperatura en un tanque, hasta los más complicados en los cuales se hace uso de equipos sofisticados y conjuntos de algoritmos de control óptimo, control robusto, inteligencia artificial, etc., (p. 252).

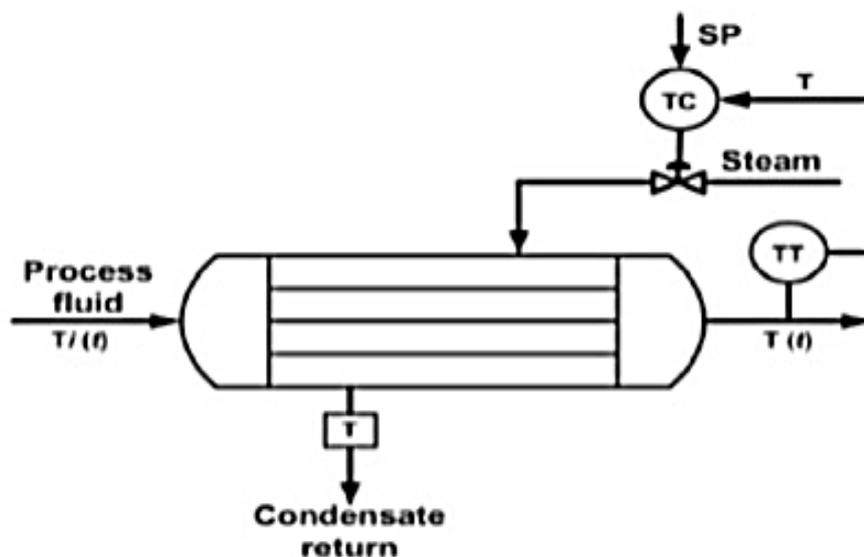
Los elementos de un sistema de control en un proceso generalmente son:

- Señales de control: son aquellas acciones elaboradas por el sistema de control, o realizadas por el operario, a través de las variables manipuladas.
- Perturbaciones: son factores externos que afectan al proceso de control, sin tener relación directa con el sistema de control ni con el operador, y pueden tener un impacto positivo o negativo en el mismo.
- Variables de salida: Son aquellas que definen la condición del proceso y son influenciadas por las variables controladas.

Para un sistema de control automático, se debe tener en cuenta una referencia conocida como "Set-Point" que se desea alcanzar y mantener. Para lograr esto, se requieren algunos elementos adicionales: el proceso, el sensor, el controlador y el actuador. El proceso es el módulo que se va a automatizar (intercambiador de calor, bomba, etc.). El sensor es el elemento que mide parámetros o variables del proceso y transforma la señal medida en señal eléctrica. El controlador compara el valor medido con el valor deseado y calcula un error, para luego actuar y corregir este error. El actuador es el equipo que regula la variable de control y ejecuta la acción de control, puede ser eléctrico, neumático o hidráulico. La Figura 5 ilustra un proceso relacionado a un intercambiador de calor.

Figura 5

Proceso relacionando a un intercambiador de calor



Nota: Tomado de *Instrumentación industrial*, (p. 499) por. A. Creus, 2011, Alfaomega

2.2.3.4. Modos de control

Creus (2011) indica que “en los sistemas industriales se puede emplear uno o una combinación de los siguientes sistemas de control: de dos posiciones (todo-nada), flotante, proporcional de tiempo variable, proporcional, proporcional, integral, proporcional, derivada, proporcional, integral y derivada” (p. 507).

- **Control proporcional**

Creus (2011) define que “en el sistema de posición proporcional existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control” (p. 508).

En la Figura 6 puede ver la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 50 °C y cuyo intervalo de actuación es de 0-100 °C. Cuando la variable controlada está en 0 °C o menos, la válvula está totalmente abierta; a 100 °C o más está totalmente cerrada, y entre 0 y 100 °C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 25 °C está abierta en un 75% y a 50 °C en un 50% (p. 508).

Es decir, la válvula se mueve con el mismo valor por cada unidad de desviación, la posición de la válvula es una copia inversa de la variable controlada.

El ajuste del controlador proporcional está determinado por la ganancia y la banda proporcional. La ganancia es la proporción entre la variación en la señal de salida del controlador y la variación en la señal de entrada. La banda proporcional es el rango de la variable de medida que la válvula de control debe recorrer para abrir o cerrar completamente.

Para Moncada (2005) un controlador Proporcional se diseña basado en la siguiente relación:

$$u(t) = K(r(t) - y(t)) \quad (2.25)$$

Donde:

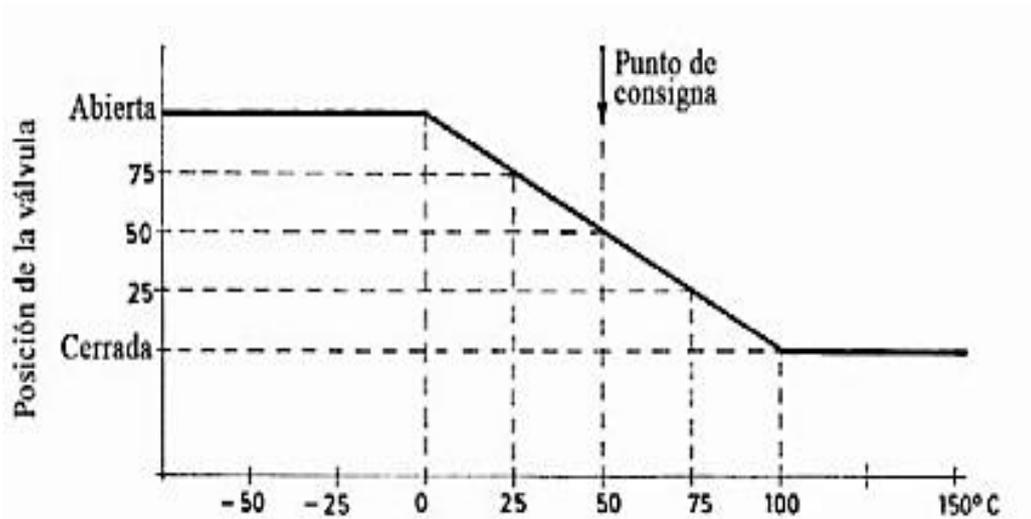
$u(t)$ = señal de control

$r(t)$ = la referencia

$y(t)$ = salida medida

Figura 6

Control proporcional



Nota: Tomado de *Instrumentación industrial*, (p. 508) por. A. Creus, 2011, Alfaomega.

- **Control proporcional – integral**

El control integral actúa cuando hay una diferencia entre la variable y el punto deseado. Integra esta diferencia con el tiempo y la agrega a la acción proporcional. La Figura 7 muestra la respuesta ante una entrada de un controlador proporcional-integral y el gráfico de t_i (minutos/repetición). Se caracteriza por el tiempo de acción integral en minutos por repetición, que es el tiempo que la válvula tarda en repetir el mismo movimiento debido a la acción proporcional ante una señal de entrada. Sólo se utiliza cuando es necesario mantener una variable en un valor constante que siempre sea igual al punto de consigna.

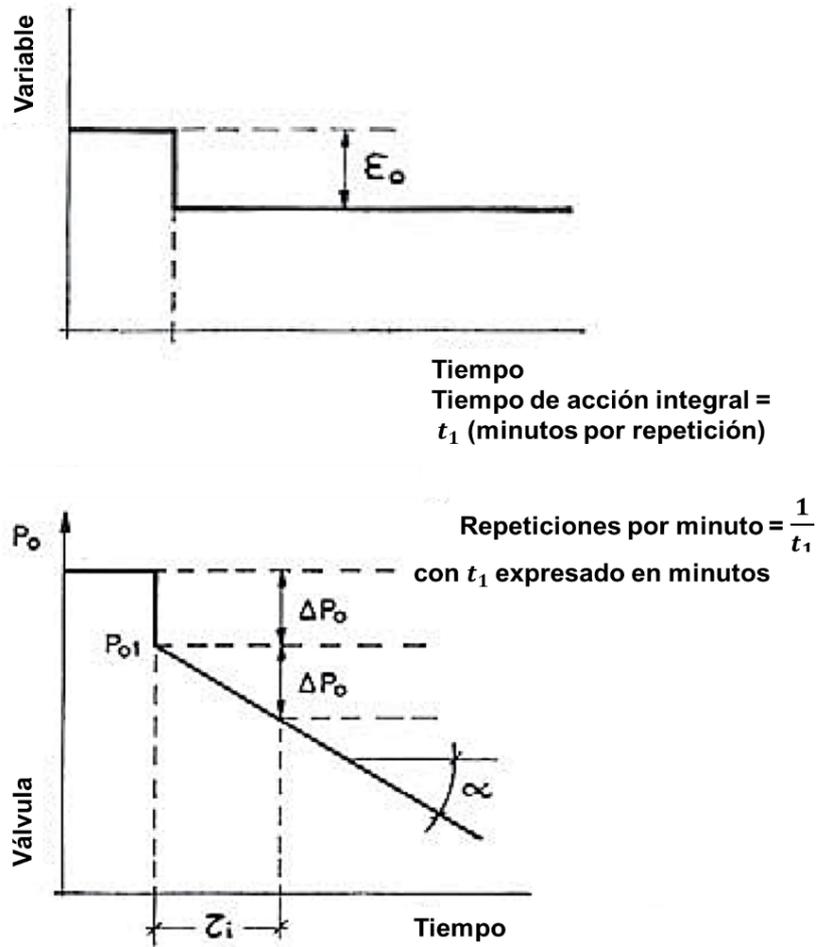
Para Moncada (2005) el problema con un controlador proporcional es que siempre existe un error de control persistente. Para evitar esta situación se agrega una acción integral al controlador. Un controlador proporcional – integral tiene la siguiente relación:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.26)$$

Donde, $e(t)$ es el error de control, que se determina mediante la diferencia entre la referencia y la señal de salida.

Figura 7

Respuesta a un escalón del controlador PI



Nota: Tomado de *Instrumentación industrial*, (p. 510) por. A. Creus, 2011, Alfaomega

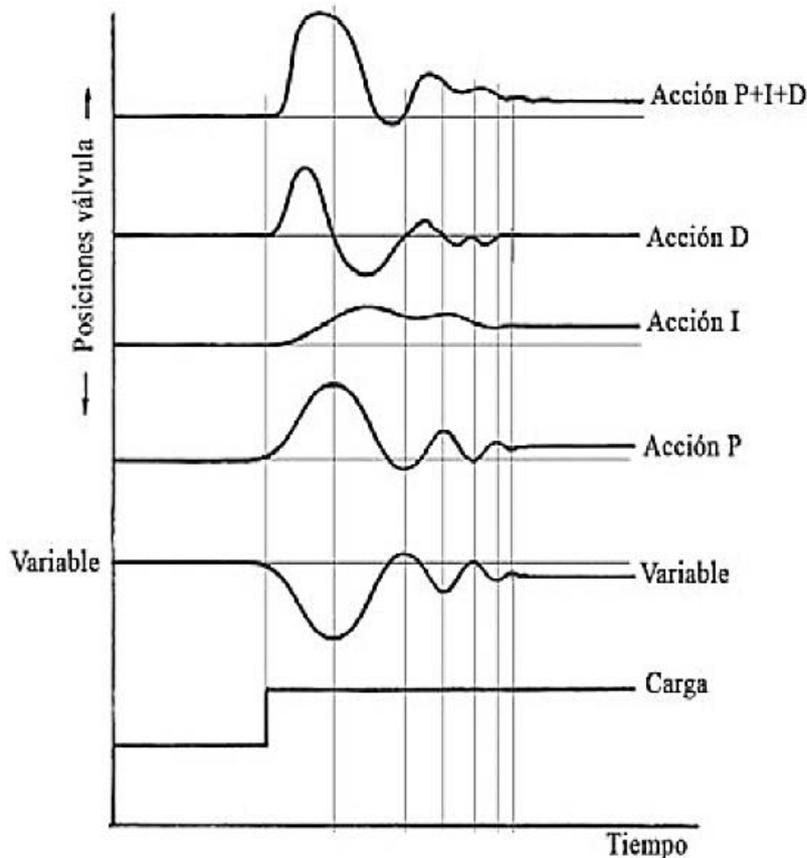
- **Control proporcional – integral – derivativo**

Según Creus (2010), la combinación de las tres acciones proporcional, integral y derivativa en un controlador (Figura 8) crea un instrumento de control que tiene las siguientes características:

- La acción proporcional cambia la posición de la válvula en proporción a la diferencia entre la variable y el punto de consigna.
- La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la diferencia entre la variable y el punto de consigna.
- La acción derivativa corrige la posición de la válvula en función de la velocidad de cambio de la variable controlada.

Figura 8

Control proporcional, integral y derivado



Nota: Tomado de *Instrumentación industrial*, (p. 515) por. A. Creus, 2011, Alfaomega.

Moncada (2005) menciona que en ocasiones la información adicional es requerida para obtener un buen control. Por ejemplo, la derivada del error de control proporciona un estimado de futuros valores de error. Al depender la señal de control de la derivada del error se obtiene un control más suave y preciso. Un controlador PID manifiesta la siguiente relación:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.27)$$

Donde, T_d es llamada la derivada de tiempo del controlador.

2.2.3.5. Controladores analógicos y digitales

Según Creus (2010), existen tres tipos de controladores: neumáticos, eléctricos y digitales. Los controladores neumáticos están en desuso debido a su menor exactitud y porque han alcanzado su límite de desarrollo. La utilización de estos instrumentos

ha disminuido a medida que los sistemas digitales han mejorado en el tratamiento de las señales y la información. Los controladores eléctricos utilizan ampliamente el amplificador operacional para amplificar, atenuar y filtrar señales. Los sistemas de control analógico encuentran en el amplificador operacional un elemento de conmutación sencillo. Los controladores digitales tienen un procesador o microprocesador y una memoria principal que están comunicados con periféricos como monitores, teclados e impresoras. Estos controladores digitales realizan directamente las funciones de control que antes eran realizadas por los instrumentos neumáticos y electrónicos y no requieren otros instrumentos adicionales. El software son las instrucciones y programas que permiten la eficaz utilización del computador, el hardware son los dispositivos físicos que conforman el computador y los periféricos, y el firmware son los circuitos que contienen programas inalterables en ROM o EPROM.

2.2.3.5.1. Ventajas del control digital

De acuerdo con De Castro (2003), los controladores digitales tienen varias ventajas importantes, como la posibilidad de implementar algoritmos de control más complejos, la capacidad de reprogramación y monitoreo, la disminución del tiempo de diseño, la reducción de componentes discretos y la mejora en la fiabilidad del sistema. Además, los controladores digitales son fáciles de integrar en sistemas más grandes, tienen una menor sensibilidad a los cambios con el tiempo y son menos propensos a ser afectados por el ruido.

2.2.4. Automatización

Según la Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas, la automática se refiere a la utilización de métodos y técnicas para reemplazar la intervención humana en tareas preestablecidas tanto físicas como mentales. La automatización, por su parte, es la implementación de la automática en la gestión de procesos industriales (Ponsa, 2005).

Según Mendiburu (2003), la automatización debe verse como una herramienta para los trabajadores, ya que tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el trabajo. Los trabajadores conocen el proceso, mientras que los diseñadores e instaladores del sistema de automatización solo proporcionan facilidades técnicas para aumentar la cantidad y la calidad de la producción. Los sistemas de automatización están

compuestos de dos partes: una parte de mando que es la estación central de control y la parte operativa que actúa directamente sobre la máquina y está formada por componentes como motores, cilindros, compresores, bombas y relés.

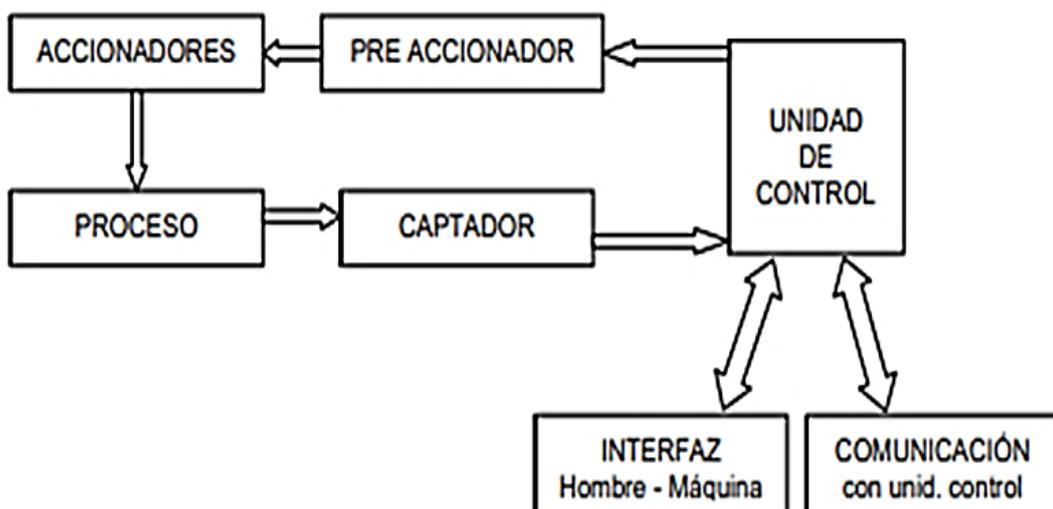
2.2.4.1. Elementos de automatización

Según Mendiburu (2003), para un sistema automatizado es necesario tener los siguientes componentes:

- **Máquinas:** Equipos mecánicos que llevan a cabo los procesos en los productos o materia prima.
- **Accionadores:** Equipos conectados a las máquinas que permiten realizar movimientos y otros procesos, como calentamiento y ensamblaje. Pueden ser eléctricos, neumáticos o hidráulicos.
- **Pre-accionadores:** Se utilizan para controlar y activar los accionadores.
- **Captadores:** Sensores y transmisores que detectan el estado del proceso y lo envían a la unidad de control.
- **Interfaz hombre-máquina:** Comunica al operario con el proceso, puede ser una interfaz gráfica o pulsadores, teclados, visualizadores, etc.
- **Elementos de mando:** Elementos de cálculo y control que regulan el proceso, como los autómatas, que conforman la unidad de control.

Figura 9

Elementos de un sistema automatizado



Nota: Tomado de *Automatización medio ambiental*, (p. 35) por. H. Mendiburu, 2003.

En el concepto de automatización esta implícita la supresión total o parcial de la intervención humana en la ejecución de diversas tareas, industriales, agrícolas, domésticas, administrativas o científicas.

2.3. Marco conceptual

A continuación, se definen términos básicos que están relacionados con la presente investigación

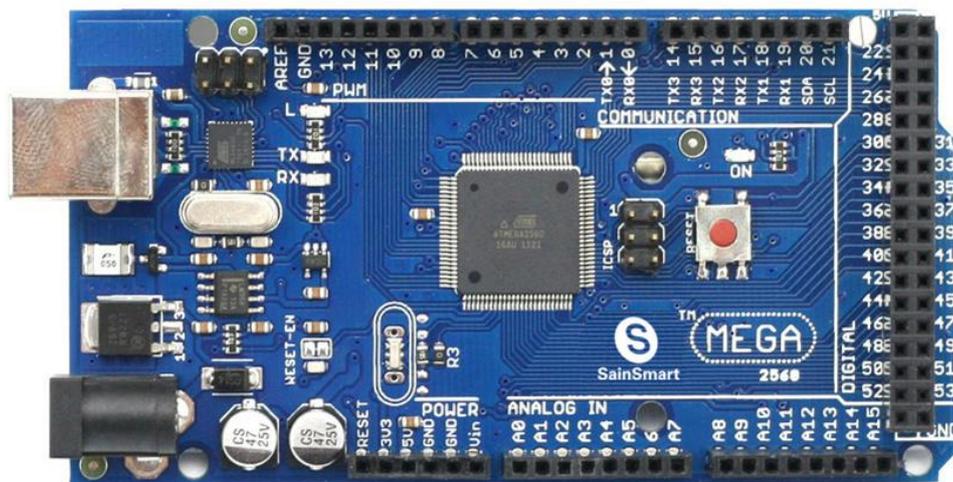
2.3.1. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica libre que combina hardware y software de fácil uso. Según la Figura 10, las placas de Arduino pueden leer entrada, ya sea de un sensor, un botón o un mensaje de Twitter, y transformarla en una salida como activar un motor, encender un LED o publicar algo en línea.

De acuerdo a Torrente (2013), Arduino consiste en tres partes: una placa de hardware libre que incluye un microcontrolador reprogramable y conectores para sensores y actuadores, un software de desarrollo gratuito y multiplataforma que permite escribir y guardar código en la memoria del microcontrolador, y un lenguaje de programación libre.

Figura 10

Placa Arduino Mega



Nota. Placa Arduino Mega, Adaptado de *placa Arduino* [fotografía], por Arduino, 2022, (<https://www.arduino.cc/>).

2.3.2. Microcontroladores

Según Torrente (2013), un microcontrolador es un circuito integrado que puede ser programado y realizar de forma autónoma instrucciones previamente definidas. Consta de tres elementos básicos: la CPU (Unidad Central de Proceso) que ejecuta las instrucciones, diferentes tipos de memoria (persistentes y volátiles) que almacenan las instrucciones y datos, y patillas de E/S (entrada/salida) que permiten la comunicación con el exterior.

Las principales diferencias entre un microprocesador y un microcontrolador. Un microprocesador según Aguayo (2004) señala que:

El primero requiere algunos circuitos integrados adicionales, por ejemplo: memorias RAM para almacenar los datos temporalmente y memorias ROM para almacenar el programa que se encargaría del proceso del equipo, un circuito integrado para los puertos de entrada y salida y finalmente un decodificador de direcciones” (p.331).

Un microcontrolador según Aguayo (2004) menciona que:

Un microcontrolador es un solo circuito integrado que contiene todos los elementos electrónicos que se utilizan para hacer funcionar un sistema basado con un microprocesador; es decir contiene en un solo integrado la Unidad de Proceso, la memoria RAM, memoria ROM, puertos de entrada, salidas y otros periféricos, con la consiguiente reducción de espacio (p.332).

2.3.3. Sensores

Un sensor es un dispositivo que convierte una variable física en una señal eléctrica manipulable. Estos proveen señales eléctricas a la salida, ya sea en forma analógica o digital. Los sensores recopilan información del mundo exterior y la transforman en una señal que puede ser controlada por la circuitería interna. Son dispositivos que convierten la energía de su entorno de medición en una señal de salida que depende de la variable que se mide.

Pallas (2003) menciona que:

Los sensores son indispensables en la automatización de industrias de proceso y manufacturados, incluida la robótica, en ingeniería experimental, en

sectores no productivos como son el ahorro energético y el control ambiental (aire, ruido, calidad de agua), en automóviles y electrodomésticos, en agricultura y medicina, etc., (p.345).

Los sensores pueden clasificarse de muchas formas distintas, por ejemplo, en la Tabla 1 se observa la clasificación de acuerdo a criterios como aporte de energía, señal de salida y modo de operación, sin embargo, existe otra clasificación de acuerdo al tipo de variable a medir o por el principio de transducción utilizado.

Tabla 1

Clasificación de los sensores

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

Nota. Tomado de *Sensores y acondicionadores de señal*, (p. 07) por. R. Pallás, 2003, Marcombo.

2.3.4. Variables de proceso

Una variable de proceso es una condición física o química que es de interés medir y controlar, ya que puede alterar la producción o manufactura.

2.3.4.1. Temperatura

La temperatura es un factor crucial en los procesos químicos, por lo que es necesario medirla con precisión para un control efectivo. Según Creus (2010), existen diversos fenómenos que son influenciados por la temperatura y utilizados para su medición, incluyendo: variaciones en volumen o estado de los cuerpos, variación de resistencia de conductores y semiconductores, f.e.m. en la unión de dos metales, intensidad de radiación emitida, y otros fenómenos usados en el laboratorio.

2.3.4.2. Flujo y caudal

Según Pallás (2003), el flujo se refiere al movimiento de fluidos a través de canales abiertos o cerrados y el caudal es la cantidad de material en peso o volumen que fluye por unidad de tiempo. Las mediciones de caudal son relevantes en todos los procesos de transporte de materia y energía a través de fluidos, ya sea para controlar

dichos procesos, como una simple indicación o para determinar tarifas, como sucede con agua, gas, gasolina, etc.

Creus (2010) menciona que existen dos tipos de medidores, los volumétricos que determinan el caudal en volumen del fluido, y los de masa que determinan la caudal masa. Esta última se destina a aquellas aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante, por ejemplo, en la determinación final del caudal del producto para su facturación.

2.3.4.3. Nivel

Creus (2010) indica que:

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos, que son dos mediciones claramente diferenciadas (p. 535).

Por su parte Moncada (2005) menciona:

La medición del nivel se puede definir como la determinación de la ubicación de la entrecara entre dos fluidos, separables por gravedad, con respecto a un plano de referencia fija. La medición de nivel más común es la de la entrecara entre un líquido y un gas. Otras mediciones de nivel que se encuentran con suma frecuencia son la entrecara de dos líquidos, de sólidos granulares o fluidificados y un gas, y entre un gas, y entre un líquido y su vapor (p. 35).

2.4. Marco legal

Se trabajo con el método Kern, porque sirvió de base para los demás métodos siendo uno de los primeros métodos para el estudio del comportamiento térmico del intercambiador de calor, además se prefirió este método para comparar los resultados con la literatura.

Del mismo modo también se consultó la normativa de diseño, fabricación y mantenimiento de intercambiadores de calor, propuesta por las normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).

Las normas y estándares TEMA definen los tipos de intercambiadores de calor y las tolerancias de mecanizado y montaje.

El acrónimo TEMA corresponde a las siglas en inglés de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares, formada por los principales fabricantes de intercambiadores de calor, de carcasa y tubos. La nomenclatura empleada por la norma TEMA para identificar un intercambiador de calor tubular es por medio de tres letras que indican lo siguiente: La primera letra hace referencia al tipo de cabezal de entrada, la segunda letra indica el tipo de coraza, y la tercera letra indica el tipo de cabezal de retorno. (TEMA, 1999, p.108).

Se emplea la simbología y diagramas de instrumentación de la Norma ISA (Instrument Society of America), el propósito de esta norma es establecer un medio uniforme de designación de instrumentos y los sistemas de instrumentación usados para la medición y control.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

Según Manuel Borja (2016) la investigación de nivel aplicativo está orientado a la aplicación inmediata sobre una problemática antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal, en referencia a lo anterior, el tipo de investigación es aplicativo.

3.2. Nivel de investigación

La investigación es de nivel experimental, porque se construye un escenario controlado para la manipulación de una o más variables a fin de obtener la solución al problema planteado, y certificará la hipótesis generada.

3.3. Población y muestra

Para Arias (2012), la población es el conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales aplica las conclusiones de la investigación. En este sentido se define a la población y muestra de estudio para el presente proyecto:

- **Población**
Intercambiadores de calor
- **Muestra**
Intercambiador de calor de tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor.

3.4. Técnicas de recolección de datos

La técnica se entiende como aquel procedimiento de obtener datos o información, mientras que un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso que se usa para obtener, registrar o almacenar esa información.

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

- Observación de los datos de temperatura y caudal
- Experimento (Simulación, algoritmos, programación)

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

- Ficha de observación
- Material experimental (sensores, microcontroladores,)

3.5. Materiales y equipos

3.5.1. Intercambiador de calor de tubo y coraza

La investigación se desarrolló en el intercambiador de calor compacto de tubo y coraza, como se muestra en la Figura 11, al cual se añadió: el soporte (estructura sólida), un tanque para almacenamiento de agua, un tablero de control y las conexiones necesarias para realizar la automatización.

Figura 11

Intercambiador de calor de tubo y coraza



3.5.2. Componentes para la automatización

Los componentes necesarios para realizar la automatización se describen de forma detallada en los siguientes párrafos:

3.5.2.1. Bomba de agua

Para regular el flujo de agua caliente que ingresa que ingresa Intercambiador de calor se añadió una bomba de agua de tipo centrífuga, como se observa en la Figura 12, con conexión roscada de 1/2" de diámetro, de bajo consumo eléctrico, su motor interno es de tipo sin escobillas (brushless) y tiene una potencia de 19 W y permite un flujo de agua de hasta 800 litros por hora.

Figura 12

Bomba centrífuga



Nota. Adaptado de *Bomba centrífuga* [fotografía], por Naylamp Mechatronics, 2022,

3.5.2.2. Resistencia de inmersión de 6000 watts

La implementación de este componente es necesario porque facilitó el calentamiento del fluido a la temperatura que se desea trabajar.

Figura 13

Resistencia de inmersión



Nota. Adaptado de *Resistencia de inmersión* [fotografía], por Mazcr.com, 2022,

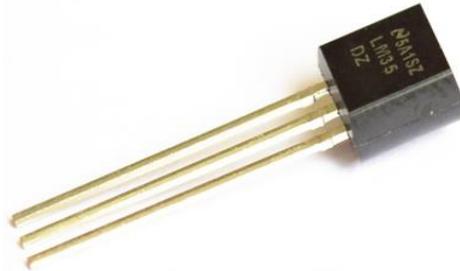
3.5.2.3. Sensores de temperatura

Para poder controlar la temperatura de ingreso y salida en el intercambiador de calor de coraza y tubo, se añadió los sensores de temperatura LM35 el cual se muestra en

la Figura 14, con alimentación directa a una fuente de 5 V y que entrega una salida analógica entre 0 V - 1,5 V. Su rango de trabajo es de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 14

Sensores de temperatura



Nota. Adaptado de sensor de temperatura [fotografía], por Naylamp Mechatronics,

3.5.2.4. Sensor de caudal

Para medir el caudal del fluido frío y caliente que ingresa al intercambiador de calor se añade el sensor de flujo de agua YF-S201 de 1/2", se muestra en la Figura 15. Es un caudalímetro electrónico de tipo turbina, compatible con sistemas digitales como Arduino, PIC, Raspberry Pi, PLC, etc.

Figura 15

Sensor de caudal



Nota. Adaptado de *Caudal* [fotografía], por Naylamp Mechatronics, 2022,

3.5.2.5. Sensor de nivel

Para controlar el nivel de agua superior e inferior dentro del tanque se usó el sensor de nivel de Agua ON/OFF como lo muestra la Figura 16, El sensor se comporta de forma similar a un switch o interruptor.

Figura 16

Sensor de nivel



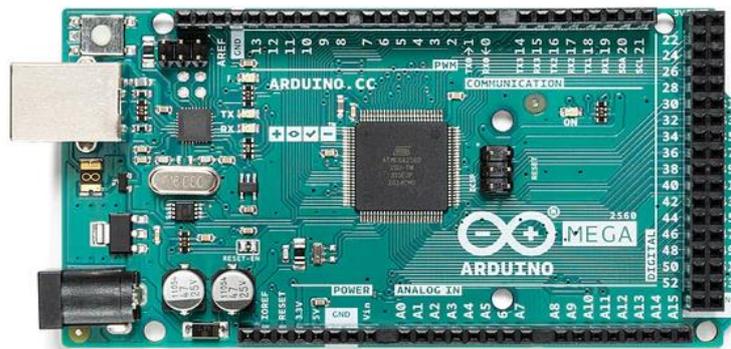
Nota. Adaptado de Sensor de nivel [fotografía], por Naylamp Mechatronics, 2022,

3.5.2.6. Microcontrolador Arduino mega

El encargado de realizar el control de todos los componentes anteriormente mencionados es el microcontrolador ATmega2560 de la placa Arduino Mega, el cual presenta 54 pines de entrada/salida digital (15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas. Un oscilador de cristal de 16 MHz. 4 UART (puertos seriales de hardware). Una conexión USB. Un encabezado ICSP, conector de alimentación y botón de reinicio.

Figura 17

Arduino mega



Nota. Adaptado de Arduino mega [fotografía], por Arduino.cc, 2022,

3.5.2.7. Tablero de control

El tablero de control incluirá una pantalla LCD para poder monitorear los parámetros de control en tiempo real creando la interfaz hombre máquina. Un variador, un botón de emergencia, indicador de caudal y nivel, además de contener los instrumentos

necesarios para realizar el encendido y apagado del equipo, contiene además toda la instrumentación eléctrica necesaria para realizar la automatización.

Otros herramientas e instrumentos utilizados: multímetro digital, tubos de acero inoxidable, cierra automática, cortadora, fresadora, plegadora, cizalla, esmeril de banco, taladro de banco, equipo para soldar, torno de presión, unión universal, regla, compás, etc.

3.6. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación siguió la secuencia mostrada en el diagrama de flujo de la Figura 18.

El diseño inicia considerando el ambiente de trabajo y las facilidades para realizar la investigación además de recabar información sobre las condiciones del equipo.

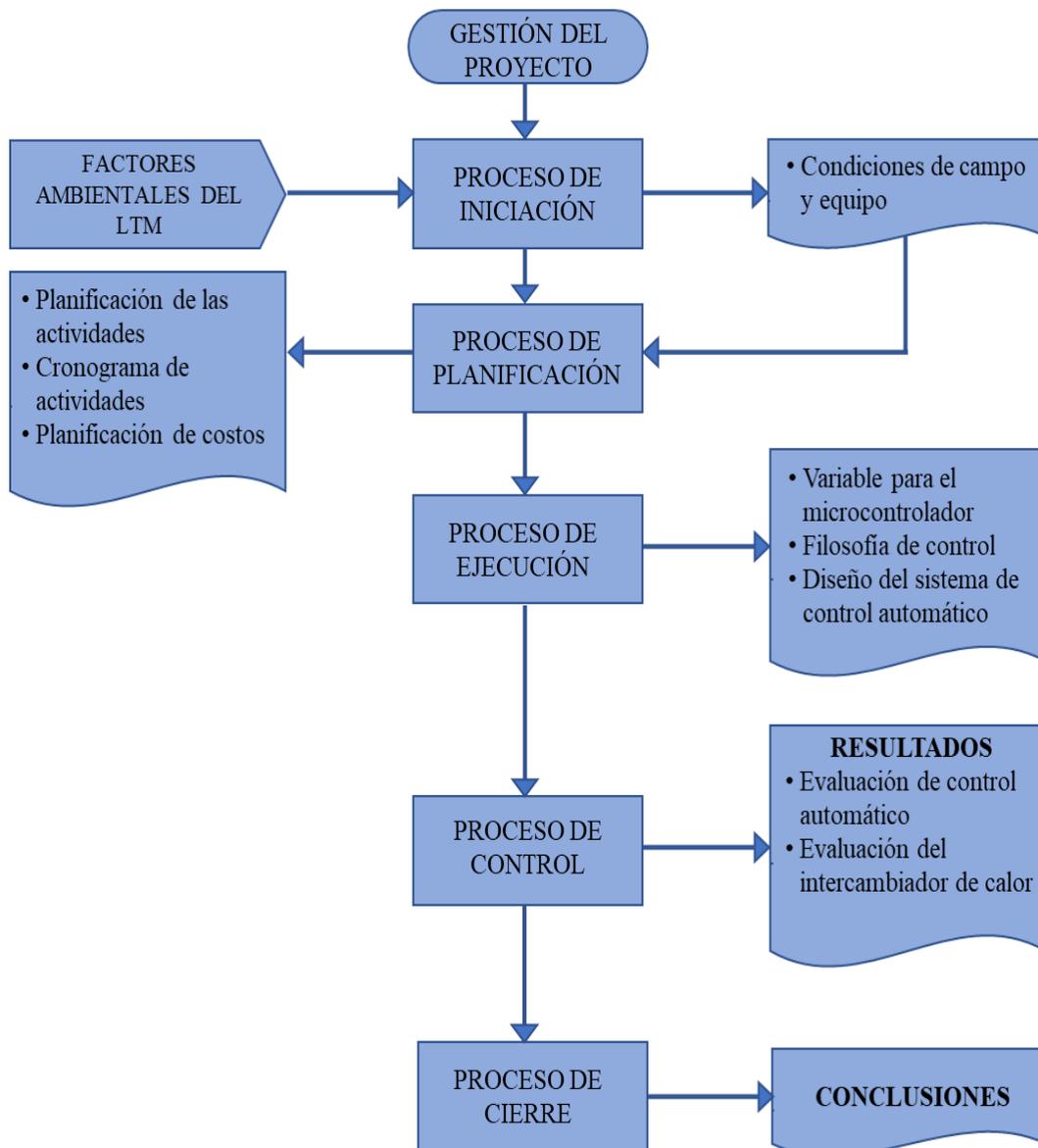
Con la información obtenida del proceso anterior y asegurando la viabilidad de la investigación fue preciso planificar las actividades, así como evaluar los costos que demandó la investigación.

Luego se elaboró el diseño del sistema de control automático, se estudió las principales variables a controlar y se realizó la secuencia lógica y el algoritmo que se debe seguir para llevar a cabo la automatización, se ejecutó en forma práctica los conocimientos, técnicas y herramientas necesarias para asegurar el objetivo de la investigación.

Finalmente, se realizó la evaluación del sistema automatizado, se evaluó los controles, los sensores y la programación. Se identificó los posibles problemas y se adoptó las acciones correctivas necesarias, así como realizar las recomendaciones y acciones preventivas frente a posibles problemas futuros. De esta manera se da respuesta al planteamiento del problema y brindar recomendaciones que puedan ser usadas para proyectos posteriores.

Figura 18

Diagrama de bloques del diseño de investigación



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Intercambiador de calor tubo y coraza

La investigación se realizó en el laboratorio de transferencia de masa de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, la cual es abastecida con energía eléctrica trifásica, sistema de agua potable, además de contar con las herramientas e instrumentos necesarios para la ejecución de la investigación.

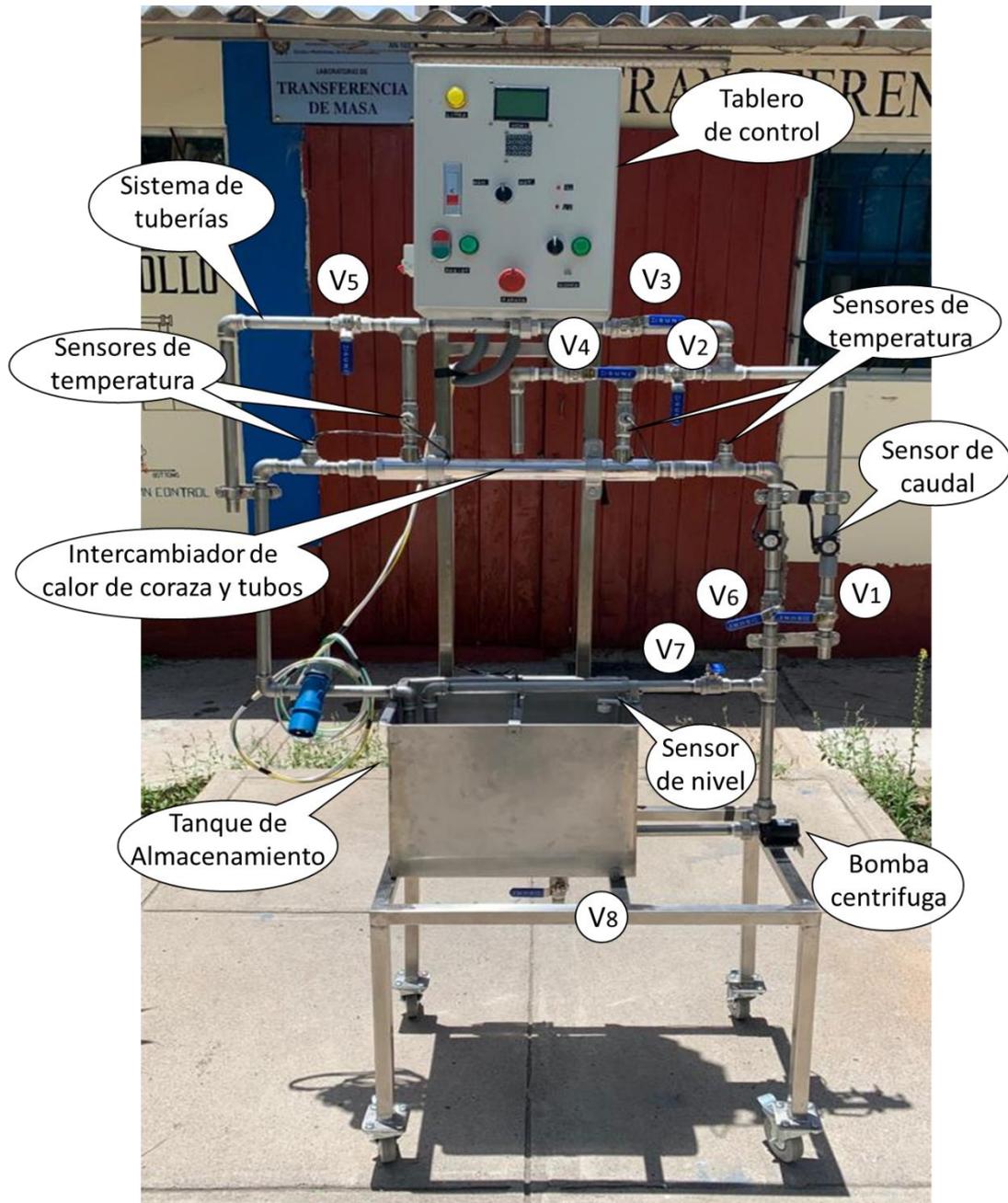
En cuanto a las condiciones iniciales del intercambiador de calor tubo y coraza, este carecía de una estructura sólida que dificultaba la instrumentación y el monitoreo de las variables del proceso de operación tales como temperaturas de entrada y salida del fluido caliente y frío, sistema para regular y medir el flujo del fluido, un sistema mediante el cual alimentar el fluido caliente al intercambiador de calor y mantener la temperatura constante de salida. Por lo que, primeramente, se procedió a diseñar la estructura para realizar la instrumentación y el ensamblaje del intercambiador de calor, además de instalar los sensores y realizar el circuito de conexión en el tablero de control. La Figura A7(a) del anexo 7, muestra el intercambiador de calor inicial.

El nuevo equipo está dispuesto de un sistema de cañerías de tubos de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " de diámetro que permite el ingreso del fluido frío y caliente durante todo el proceso y según las necesidades puede ser operado en paralelo y contracorriente, para tal efecto se instaló una serie de válvulas manuales. Dentro del sistema de tuberías se incorpora los sensores de temperatura y caudal tanto para el fluido caliente y fluido frío al ingreso y a la salida del intercambiador de calor. Se instaló una bomba de agua centrífuga para ser controlado automáticamente y variar el flujo de agua caliente que ingresa al intercambiador de calor. También está provisto de un tanque de almacenamiento de fluido esto facilitó el control de la temperatura del fluido caliente que ingresa al

intercambiador de calor. En dicho tanque se acondicionó una resistencia de inmersión, sensores de temperatura y nivel. Los resultados se muestran en la Figura 19.

Figura 19

Equipo de intercambiador de calor tubo y coraza



4.2. Diseño del sistema de control automático

El sistema de control automático está controlado por el microcontrolador de la placa Arduino Mega 2560, quien es el encargado de recibir toda la información y emitir ordenes de acuerdo a las condiciones de operación. El microcontrolador al recibir una determinada condición de operación, emite una señal de respuesta, que es ejecutado

por los actuadores. El diagrama esquemático se muestra en la Figura 20 y el diagrama del tablero de mando se muestra en el anexo 6.

Figura 20

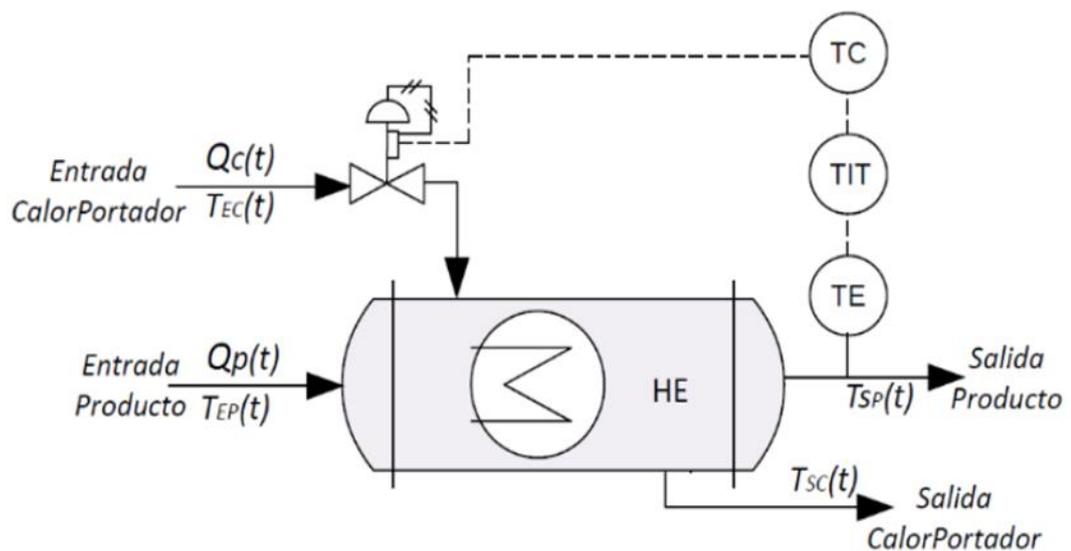
Diagrama esquemático del control automático



La variable a controlar es la temperatura a la salida del intercambiador de calor del fluido frío. Se fija una temperatura de salida deseada para el fluido caliente (set point), en el caso de que la temperatura de salida no alcance el valor deseado, automáticamente accionarán los actuadores aumentando o disminuyendo el flujo del fluido frío, hasta llegar al set point deseado y el sistema seguirá operando sin cambios hasta finalizar la operación, tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Plano P&ID del intercambiador de calor

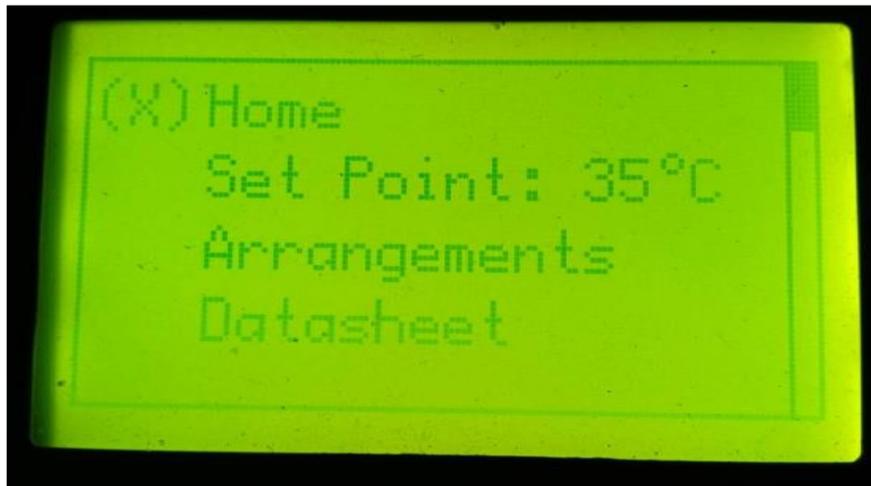


La supervisión local se realizó a través de la pantalla HMI interfaz humano máquina. Cuando el proceso de intercambio de calor se encuentre en actividad, la pantalla LCD,

informa en tiempo real las condiciones y valores de las principales variables del proceso como son las temperaturas de los sensores instalados en el tanque y en el circuito de tuberías, así, como también el caudal de entrada y salida del sistema Figura A7 (h) del Anexo 7. A través de la pantalla LCD, también se puede introducir condiciones de operación, con la ayuda de un conder. Se fijó valores que luego serán ejecutados de forma automática por el microcontrolador, como se muestra en la Figura 22 donde se fija el valor de set point. Es decir, no se tuvo la necesidad de ir regulando la temperatura de entrada del fluido caliente para obtener una temperatura de salida deseada. Esta operación lo realiza el microcontrolador, a base de códigos y algoritmos de programación que fueron almacenados en su memoria.

Figura 22

Pantalla LCD con el valor de set point deseado



El código de programación se realizó en la IDE de Arduino, en base al lenguaje de programación processing. Teniendo en cuenta secuencia de la lógica de programación la cual se muestra en la Figura 23.

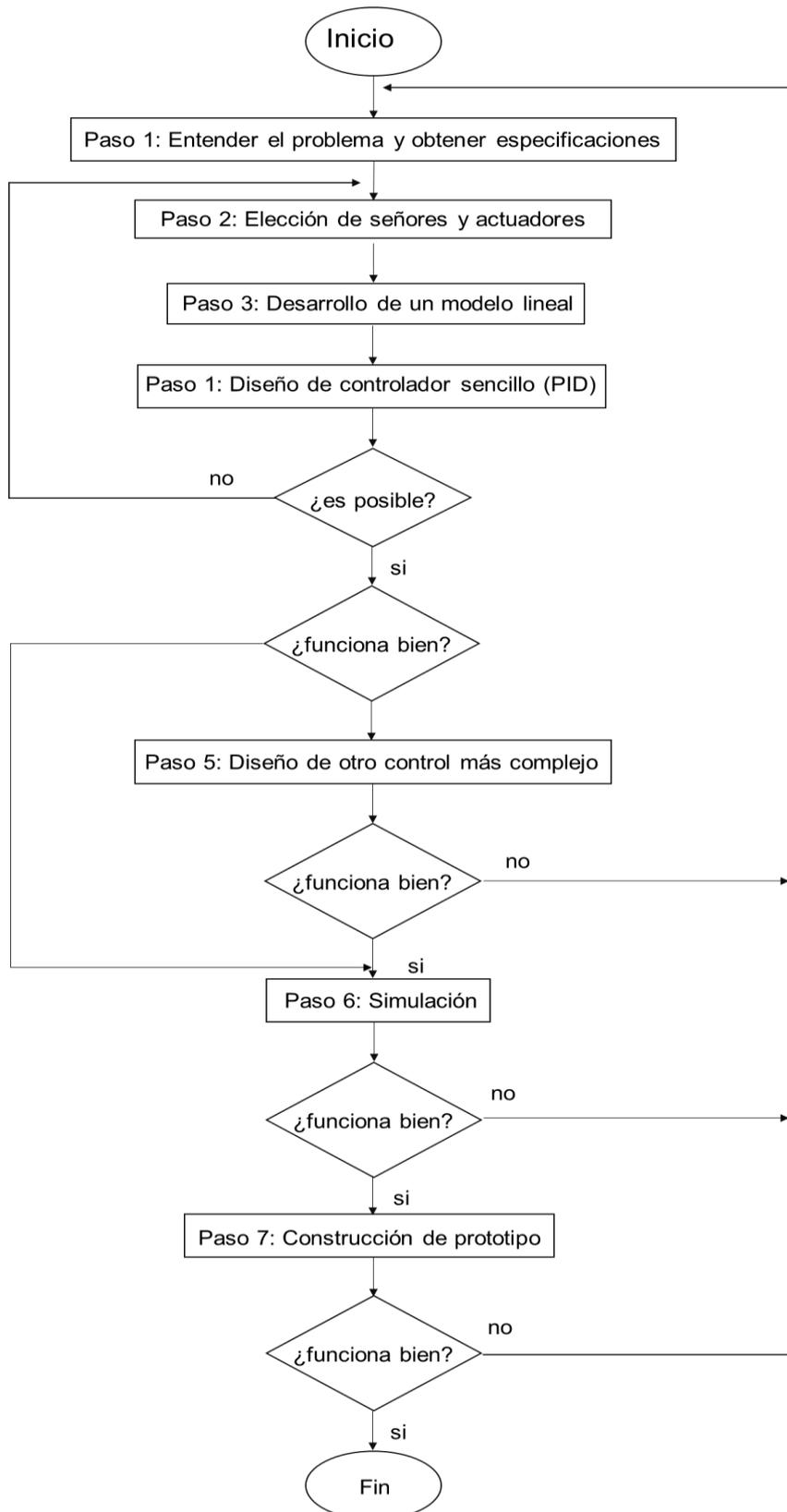
El lenguaje de programación en Arduino consta de tres partes principales:

- Creación de variables globales e invocación de librerías.
- La función Void Setup () se llama al iniciar el programa
- La función Void Loop () incluye el código que se ejecuta en forma continua, permite que el programa responda a constantes cambios.

El código completo de programación se encuentra en el Anexo 5.

Figura 23

Secuencia para realizar la lógica de programación



4.3. Operación del intercambiador de calor

4.3.1. Modo Manual

Para la operación del equipo de forma manual, se procedió con los arreglos en paralelo y contracorriente teniendo en consideración la ubicación de las válvulas detalladas en la Figura A7 (i) del Anexo 7.

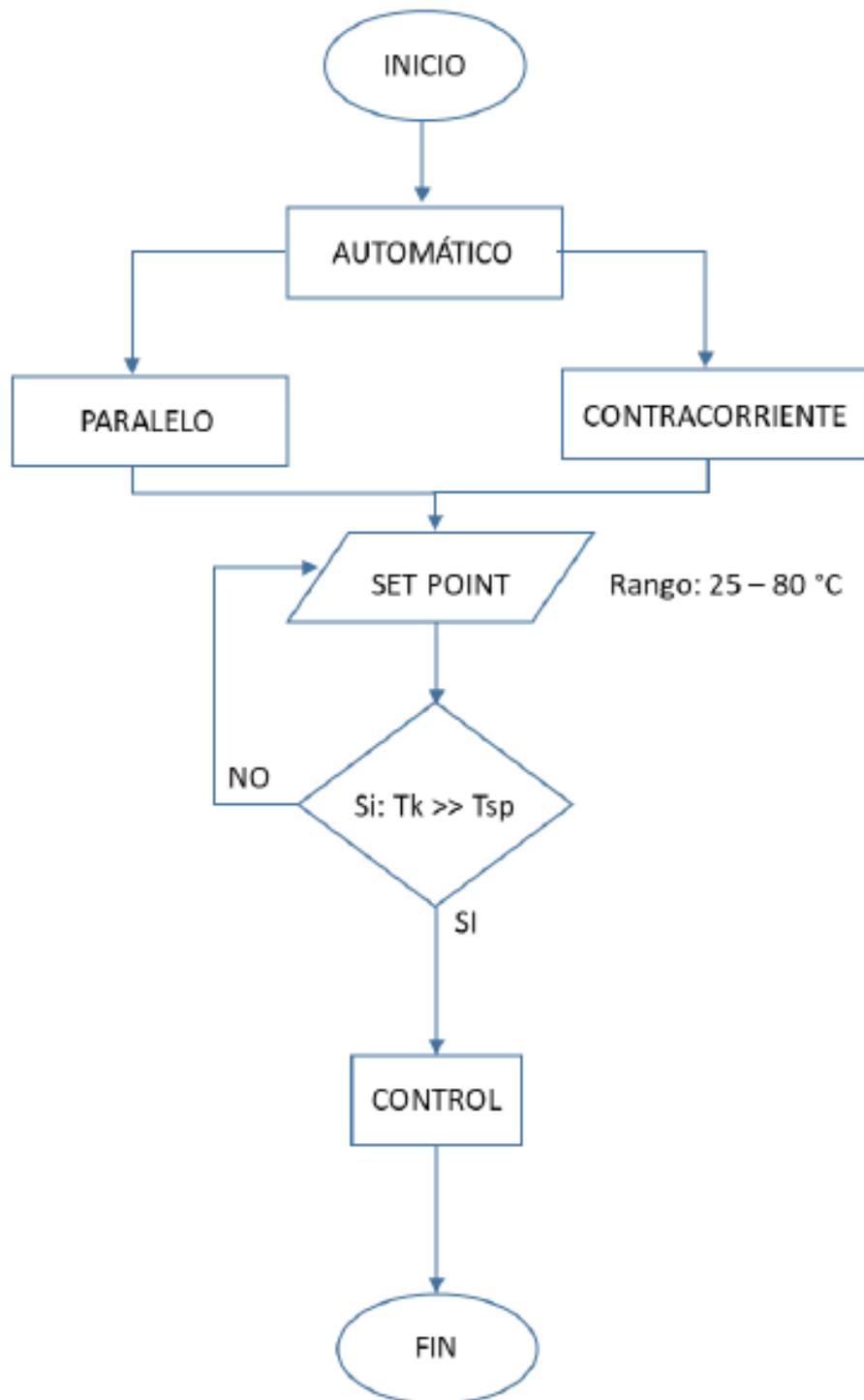
1. Verificar que el tanque de calentamiento de agua contenga 30 litros aproximadamente. Encender la llave termomagnética del equipo.
2. Verificar que las válvulas V_6 totalmente abierto, V_7 debe estar semi abierto.
3. Poner en marcha el pulsador del controlador para encender R_1 y generar calentamiento del agua en el tanque. Para el buen mezclado de temperatura poner en marcha la bomba por más de un minuto cada cierto tiempo hasta alcanzar la temperatura deseada y así recircular el agua caliente, a través de la válvula del by-pass.
4. Inicio del ensayo con flujo en paralelo o contracorriente:
5. Poner en marcha la bomba luego abrir la válvula de ingreso hacia el sensor de caudal, de igual manera hacer circular el líquido frío por un tiempo de 3 a 4 minutos, para luego realizar la lectura de perfiles de temperaturas de agua caliente y frío en el HMI. Leer el caudal del líquido frío y caliente con sus respectivos sensores de caudal. Realizar las lecturas para diferentes caudales.
6. En Paralelo: abierto las válvulas V_1 , V_2 y V_5 , cerrado las válvulas V_4 , V_3 .
7. En contracorriente: abierto las válvulas V_1 , V_3 y V_4 , cerrado las válvulas V_2 , V_5 .
8. Una vez que se culmine las lecturas apagar el pulsador de resistencia y switches de bomba y finalmente la llave termomagnética del equipo.
9. En caso de alguna emergencia presionar el botón de parada y para activarlo girar en sentido horario.

4.3.2. Modo Automático

El algoritmo para la operación del equipo en modo automático se muestra la Figura 24. Donde al inicio se fijó el tipo de arreglo en la cual se va trabajar (paralelo o contracorriente). Se abrió las válvulas de acuerdo al arreglo elegido. Se fija un valor determinado de set point a través de la pantalla LCD, y se procedió con la operación. Si la temperatura del tanque es mayor al valor de la condición, el sistema realizará las operaciones necesarias para corregir el error, por el contrario, si la temperatura del tanque es menor a la temperatura del set point entonces se continua con el control.

Figura 24

Algoritmo para el funcionamiento automático



4.3.2.1. Control automático

Para realizar el control automático del sistema, primero se analizó la estabilidad del lazo de control, por lo que al registrar las muestras y realizar las corridas en Matlab y Simulink se obtuvo un proceso de primer orden, además de un retenedor de primer orden y un controlador PI discreto:

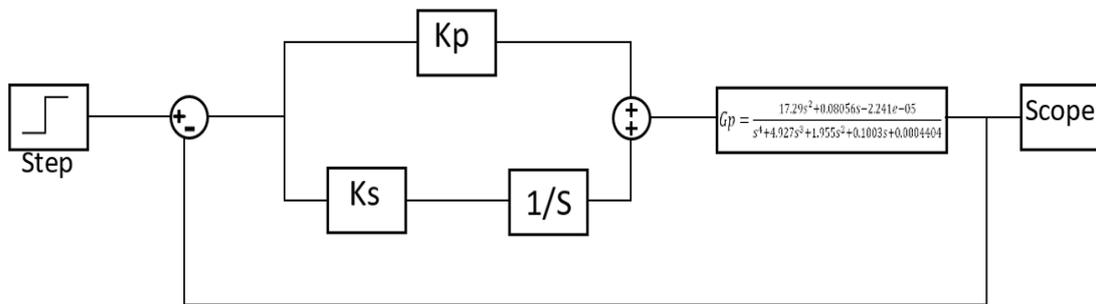
$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1}$$

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

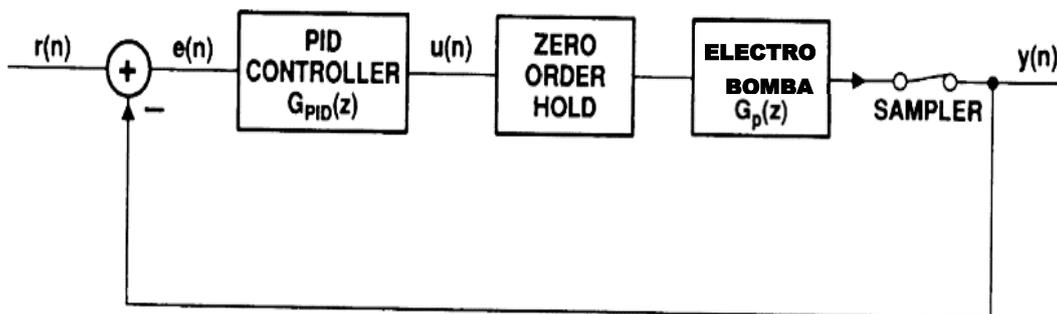
La Figura 25 muestra los diagramas del control automático como, (a) diagrama de bloque del sistema de control utilizado el intercambiador de calor, (b) diagrama de bloques para el control PID y (c) circuito para la generación de señales.

Figura 25

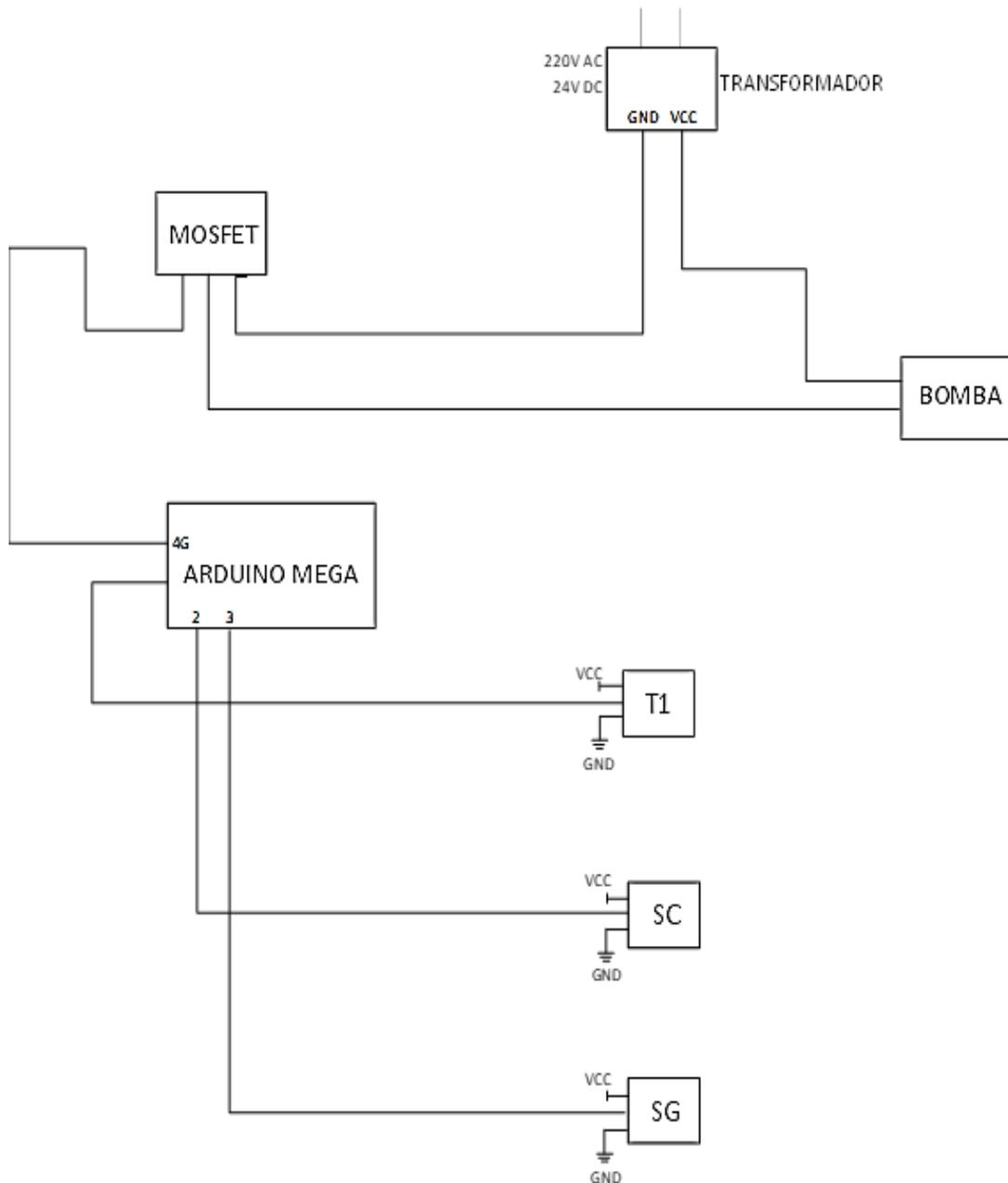
Diagramas de control automático



(a) Diagrama de bloque del sistema de control



(b) Diagrama de bloques para el control PID



(c) Diseño del circuito para la generación de señales

Los cálculos completos se detallan en el Anexo 4 a través del modelamiento del controlador en Matlab y Simulink.

4.3.3. Intercambiador de calor tubo y coraza

El análisis del intercambiador de calor se realizó mediante el método Kern.

Especificaciones del equipo:

Tipo de material: Acero inoxidable SS-304.

Sistema: Agua-Agua

Tabla 2

Características del intercambiador de calor

Especificaciones del Intercambiador de calor tubo y coraza	
Sistema	agua-agua
Intercambiador de calor	Tubo y coraza
Dimensiones de intercambiador de calor	
Longitud total, Lt (<i>mm</i>)	420
Diámetro interno di, (<i>mm</i>)	1,2210
Diámetro externo do, (<i>mm</i>)	1,5372
Distancia entre tubos Pt, (<i>mm</i>)	4,04
Diámetro interno de la coraza (<i>mm</i>)	32,94
Diámetro externo OD, (<i>mm</i>)	33,26
Espaciamiento de los deflectores (<i>mm</i>)	10,0
Número de pasos para los tubos	1
Número de pasos coraza	1
Número de tubos	55
Arreglo de los tubos	triangular

Tabla 3

Datos de temperatura del intercambiador de tubo y coraza

CONTRACORRIENTE			
Fluido caliente ($\mathcal{G}=5,71 \text{ lpm}$)		Fluido frío ($\mathcal{G}=5,71 \text{ lpm}$)	
$T_1, ^\circ C$	46,12	$t_1, ^\circ C$	17,10
$T_2, ^\circ C$	31,69	$t_2, ^\circ C$	29,31

Tabla 4

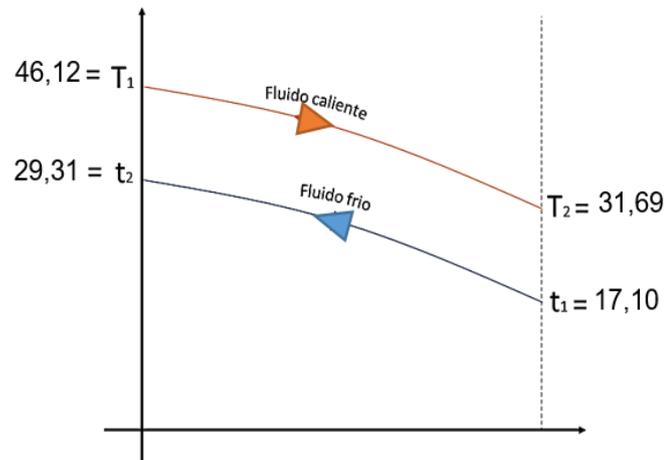
Propiedades del fluido, agua (H_2O)

	Caliente	Frío
$\bar{T}, ^\circ C$	38,91	23,20
$\rho, \text{kg} / \text{m}^3$	992,54	997,38
$C_p, \text{J} / \text{kg}^\circ C$	4179,43	4186,06
$\mu * 10^{-3}, \text{kg} / \text{m.s}$	0,6092	0,7879
$k, \text{W} / \text{m}^\circ C$	0,5279	0,5480
Pr	4,82	6,02

Nota: tomado de *Proceso de transporte y operaciones unitarias*, C.J. Geankoplis. (2000).

Figura 26

Perfil de temperatura en flujo contracorriente



Tomando en cuenta las ecuaciones (2.1) al (2.19) se tiene los siguientes resultados

Área de Transferencia

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_L F_t}$$

Delta de temperatura,

$$\Delta T_i = T_{i \text{ salida}} - T_{i \text{ entrada}}$$

Velocidad de transferencia neta de calor,

$$\begin{aligned} \dot{q}_c &= m_c * Cp * \Delta T_c \\ \dot{q}_c &= 5696,62 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_f &= m_f * Cp * \Delta T_f \\ \dot{q}_f &= 4851,40 \text{ W} \end{aligned}$$

Diferencia de temperatura media logarítmica *LMTD*

$$LMTD = \Delta T_{ln}$$

$$LMTD = \frac{(T_2 - T_{i \text{ salida}}) - (T_3 - T_{i \text{ entrada}})}{\ln \frac{(T_2 - T_{i \text{ salida}})}{(T_3 - T_{i \text{ entrada}})}}$$

$$LMTD = 15,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura promedio de los tubos

$$T_{c \text{ prom}} = \frac{T_{c \text{ entrada}} + T_{c \text{ salida}}}{2}$$
$$T_{c \text{ prom}} = 38,91 \text{ }^\circ\text{C}$$

Área lateral total

$$A_t = L_t d_o \pi N_T$$
$$A_t = 0,08861 \text{ m}^2$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U_{\text{exp}} = \frac{Q}{A_t \Delta T_L F_t}$$
$$U_{\text{exp}} = 3494,08 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

Método Kern

Área de sección transversal de un tubo

$$a_t = \frac{\pi}{4} d_i^2$$
$$a_t = 1,1709 \text{ mm}^2$$

Área total de flujo

$$a_u = N_t * a_t$$
$$a_u = 6,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Flujo de agua de calentamiento

$$m_i = \frac{Q_c}{C_p \Delta t}$$
$$m_i = 0,0944 \text{ kg / s}$$

Velocidad másica del agua

$$G_t = \frac{m_i}{a_u}$$
$$G_t = 1466,75 \text{ kg / sm}^2$$

Velocidad lineal del agua

$$v = \frac{G_t}{\rho}$$
$$v = 1,47 \text{ m / s}$$

Cálculo del coeficiente interior de agua en los tubos

$$h_i = 4200(1,35 + 0,02t)v_i^{0,8} / d_i^{0,2}$$

$$h_i = 11731,90 \text{ W} / \text{m}^2\text{°C}$$

Coeficiente de película en el lado del casco

$$a_s = \frac{(P_i - d_o)D_s B}{P_i}$$

$$a_s = 1,3706 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Flujo del agua fría

$$m_s = \frac{Q_f}{C_p \Delta t}$$

$$m_s = 0,0949 \text{ kg} / \text{s}$$

Velocidad másica del agua

$$G_s = \frac{m_s}{a_s}$$

$$G_s = 692,50 \text{ kg} / \text{sm}^2$$

Diámetro equivalente

$$D_e = \frac{1,10}{d_o} (P_i^2 - 0,917d_o^2)$$

$$D_e = 10,1293 \text{ m}$$

Reynolds

$$R_e = \frac{G_s D_s}{\mu}$$

$$R_e = 15172,06$$

Factor de transferencia de calor, se halla mediante la gráfica de la Figura 3

$$J_{Hs} = 4,628 \times 10^{-3}$$

Coeficiente de película para el lado del casco

$$h_s = J_{Hs} \left(\frac{k}{D_e} \right) R_e (P_r)^{1/3}$$

$$h_s = 6857,27 \text{ W} / \text{m}^2\text{°C}$$

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{x}{k} \frac{d_o}{D_m} + \frac{1}{h_s}}$$
$$U_t = 3832,56 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Eficiencia térmica

$$\varepsilon = \frac{t_1 - t_2}{T_1 - T_2} \times 100$$
$$\varepsilon = 81,43\%$$

Los cálculos para distintas condiciones de operación en flujo contracorriente y en flujo paralelo se muestran en el Anexo 2.

4.4. Discusión

Los resultados de la evaluación del intercambiador de calor tubo y coraza en flujo contracorriente y paralelo se muestran en la Tabla A3 (c) y (f) respectivamente, donde se obtuvo un coeficiente de transferencia global teórico de 3832,56 W/m².°C y coeficiente de transferencia global experimental de 3494,08 W/m².°C con una eficiencia de 81,43% estos valores se encuentran dentro de los estándares de los intercambiadores de calor tubo y coraza. En flujo paralelo se obtuvo un coeficiente de transferencia global teórico de 3823,28 W/m²°C, y coeficiente de transferencia global experimental de 2851,14 W/m²°C con una eficiencia de 62,30% estos valores son menores que en flujo contracorriente, se confirma con la literatura.

El diseño del controlador de cuarto orden se realizó con el Software Matlab y la simulación del mismo se realizó en el entorno de programación Visual Simulink, con una entrada de escalón de 40% de caudal máximo, tal como se detalla en el Anexo 4. El modelo de la planta de cuarto orden posee la siguiente ecuación:

$$Gp = \frac{17,29s^2 + 0,08056s - 2,241e - 05}{s^4 + 4,927s^3 + 1,955s^2 + 0,1003s + 0,00044} \text{ donde la ecuación discretizada en}$$

$$\text{transformada Z es } G(z) = \frac{0,3905z^{-1} - 0,3907z^{-2}}{1 - 0,4451z^{-1} - 1,288z^{-2} + 0,426z^{-3} + 0,309z^{-4}} \text{ con tiempo de}$$

muestreo de dos segundos. La implementación en el microcontrolador se realiza con la

ecuación diferencial del sistema representado por $u(t) = u_0 - k_p e_1 + \frac{k_i t_s}{2} e + \frac{k_i t_s}{2} e_1$ el control automático del intercambiador de calor tubo y coraza se logró realizar con el lenguaje de programación Processing y C++ en la IDE de Arduino obteniendo una respuesta del controlador estable y robusto.

El intercambiador del calor tubo y coraza se logró automatizar de manera satisfactoriamente como lo plantea Chicaiza (2014) por medio de microcontroladores y reduciendo la intervención de hombre.

En el intercambiador de calor tubo y coraza se obtiene un controlador robusto y estable como afirma Burbano (2015) el modelo analítico muestra una aproximación del comportamiento esperado en la planta, mientras que el modelo experimental permite verificar el comportamiento real y cómo es afectado por factores no considerados en el modelo matemático.

CONCLUSIONES

1. Para realizar la automatización del intercambiador de calor tubo y coraza con tecnología Arduino se debe realizar la toma de datos, el modelamiento de la planta y el control de la variable temperatura para su posterior implementación en la tarjeta Arduino y con un HMI para la operación en modo manual y automático.
2. Al llevar a cabo el diagnóstico del intercambiador de calor se determinó los equipos y materiales necesarios para llevar a cabo el control y la automatización, posteriormente se implementó y ensambló las tuberías, válvulas, tanque, sensores, acondicionadores y demás componentes necesarios para desarrollar el sistema automático.
3. Las principales variables de control en el intercambiador de calor son el caudal del fluido caliente y la temperatura de salida del fluido frío. El sistema es controlado con un PID en lazo cerrado, donde la variable de entrada es el caudal y la variable de salida es la temperatura ya sea para el arreglo paralelo o en contracorriente, con ambas variables se logra la automatización del intercambiador de calor tubo y coraza.
4. La evaluación del sistema automático se realizó con el software Matlab y las simulaciones a través de Simulink, luego se realizó la implementación usando la tecnología Arduino y obteniendo los datos en tiempo real a través del HMI, facilitando de manera didáctica el estudio de la materia de transferencia de calor y, además permite tener una visión más amplia de los conceptos básicos de la automatización y de los procesos que se pueden controlar en la industria.

RECOMENDACIONES

Para el buen funcionamiento del equipo de intercambiador de calor se recomienda:

Se recomienda que, antes de realizar la manipulación del equipo se debe leer completamente el manual, de esta manera se podrá comprender el funcionamiento, pues una mala manipulación puede causar daños en el equipo.

El tanque no debe contener liquido inferior ni superior al medidor de nivel, se recomienda un 80% de capacidad del tanque.

La bomba de dosificación será encendida siempre que se haya alcanzado la temperatura deseada.

Se debe revisar detenidamente las diferentes válvulas, dependiendo si se trabajará en paralelo o contracorriente las otras deben permanecer cerradas siempre y cuando no se haga uso de ellas.

Se recomienda un mantenimiento anual del equipo y la calibración de los sensores.

Además, se recomienda que el tanque sea cerrado para evitar formación de burbujas de aire en el equipo y realizar el aislamiento de todo el sistema para reducir las pérdidas por conducción térmica y aumentar el rendimiento del equipo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aguayo, P. (2004). Introducción al microcontrolador. Artículo, noviembre.
- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación, introducción a la metodología científica. Caracas: Episteme, C.A.
- Bolton, W. (2015). Programmable Logic Controllers (Sixth ed.). Oxford: Elsevier Ltd.
- Borja, M. (2016). Metodología de la investigación científica para ingenieros. Chicago.
- Burbano, S. (2014). Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos. Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Cao, E. (2010). Heat transfer in process engineering. New York, U.S.A: McGraw-Hill.
- Corona, L., Abarca, G., y Mares, J. (2014). Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino. México: Grupo Editorial Patria, S.A.
- Creus, A. (2011). Instrumentación industrial. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A.
- Desai, P. (2015). Python Programming for Arduino. Birmingham, Mumbai: PACKT.
- Flores, M. P. (2017). Diseño de una Mini Planta Intercambiadora de Calor controlada por un Sistema HMI/SCADA para la capacitación de los Alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Foust, A., Wenzel, L., Maus, L., Clump, C., y Maus, L. (2006). Principio de operaciones unitarias. México: Compañía Editorial Continental S.A.
- García, E. (1999). Automatización de procesos industriales. España: Universidad Politécnica de València.
- Geankoplis, C. (2000). Proceso de transporte y operaciones unitarias. México: CECOSA.
- Kakaç, S., Liu, H., and Pramuanjaroenkij, A. (2012). Heat Exchangers. Selection, Rating, and Thermal Design (3rd ed.). Boca Raton, U.S.A: CRC Press.
- Kern, D. (1999). Procesos de transferencia de calor. México: compañía Editorial Continental, S.A.
- Lajara, J., y Pelegrí, J. (2011). LabVIEW entorno gráfico de programación. Barcelona, España: Marcombo, S.A.
- Levenspiel, O. (2004). Flujo de fluidos. España: Reverté S.A.
- McCabe, w. L., Smith, J. C., y Harriott, P. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. México: McGraw-Hill/InterAmerican editores, S.A.
- Mendiburu, H. (2003). Automatización medio ambiental. Lima, Perú: Derechos Reservados.
- Moncada, L. (2005). Automatización y control de procesos. Universidad Nacional de Trujillo.
- Moncada, L. (2020). Intercambiador de calor. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo.

- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Pallás, R. (2003). Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona, España: Marcombo, Boixareu editores.
- Perry, R. H. (2008). Chemical Engineers' Handbook (8th ed.). New York, U.S.A: McGraw-Hill.
- Reyes, M., Moya, J., Cruz, O., Firvida, E., y Velázquez, J. (2014). Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante el método de Taborék. Veracruz. México: Universidad Central de Las Villas. Ingeniería Mecánica.
- Serth, R. W. (2007). Process Heat Transfer: Principles and Applications. Kingsville, TX, USA: Elsevier Science & Technology Books.
- Schwartz, M., y Manickum. (2015). Programming Arduino with. Birmingham, Mumbai.
- Welty, J., Wicks, C., y Wilson, R. (2008). Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer. EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc.
- Zohuri, B. (2017). Compact Heat Exchangers -Selection, Application, Design and Evaluation. Switzerland: Springer International Publishing.

ANEXOS

Anexo 1 Propiedades del agua líquida (SI)

Tabla A1 Propiedades de transferencia de calor agua líquida (SI)

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s, o kg/m·s)	k (W/m·K)	N_{Pr}	$\beta \times 10^4$ (1/K)	$(g\beta\rho^2/\mu^2) \times 10^{-3}$ (1/K·m ²)
0	273.2	999.6	4.229	1.786	0.5694	13.3	-0.630	
15.6	288.8	998.0	4.187	1.131	0.5884	8.07	1.44	10.93
26.7	299.9	996.4	4.183	0.860	0.6109	5.89	2.34	30.70
37.8	311.0	994.7	4.183	0.682	0.6283	4.51	3.24	68.0
65.6	338.8	981.9	4.187	0.432	0.6629	2.72	5.04	256.2
93.3	366.5	962.7	4.229	0.3066	0.6802	1.91	6.66	642
121.1	394.3	943.5	4.271	0.2381	0.6836	1.49	8.46	1300
148.9	422.1	917.9	4.312	0.1935	0.6836	1.22	10.08	2231
204.4	477.6	858.6	4.522	0.1384	0.6611	0.950	14.04	5308
260.0	533.2	784.9	4.982	0.1042	0.6040	0.859	19.8	11030
315.6	588.8	679.2	6.322	0.0862	0.5071	1.07	31.5	19260

Nota: tomado de *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. (2000), por C.J. Geankoplis, tercera edición.

Anexo 2 Evaluación del intercambiador de calor tubo y coraza

Tabla A2 (a) Datos tomados en flujo contracorriente

Nº CORRIDAS	F.CAL (LPM)	F. FRÍO (LPM)	FLUIDO CALIENTE		FLUIDO FRIO	
			SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA
1	5,27	9,71	30,23	39,78	24,75	17,37
2	5,27	9,71	29,79	39,66	24,69	17,37
3	5,27	9,71	29,88	39,42	24,62	17,37
4	5,27	9,79	29,79	39,31	24,56	17,37
5	5,27	9,71	29,87	40,15	24,50	17,37
6	5,27	9,79	29,62	39,31	24,50	17,37
7	5,27	9,79	29,53	39,07	24,44	17,37
8	5,27	9,71	29,44	39,31	24,37	17,37
9	5,27	9,79	29,44	39,07	24,31	17,37
10	5,27	9,79	29,53	39,19	24,25	17,37
11	5,27	9,79	29,18	38,84	24,12	17,37
12	5,27	9,79	29,27	38,84	24,06	17,37
13	5,27	9,71	29,18	38,72	24,00	17,37
14	5,27	9,71	29,02	38,84	23,94	17,37
15	5,27	9,71	28,76	37,92	23,75	17,37
16	5,27	9,71	29,10	38,38	23,69	17,37
17	5,27	9,71	28,68	38,38	23,69	17,37
18	5,27	9,71	28,93	38,26	23,62	17,37
19	5,27	9,79	28,76	38,26	23,56	17,37

Nº CORRIDAS	F.CAL (LPM)	F. FRÍO (LPM)	FLUIDO CALIENTE		FLUIDO FRÍO	
			SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA
1	7,94	11,05	24,04	48,46	19,75	17,37
2	7,94	11,05	25,21	48,75	20,44	17,37
3	7,86	11,05	25,69	48,60	20,75	17,37
4	7,86	11,05	26,26	48,60	21,06	17,37
5	7,86	11,05	26,63	48,60	21,37	17,37
6	7,86	11,05	27,40	48,61	21,87	17,37
7	7,86	11,05	27,95	48,46	22,31	17,37
8	7,86	11,05	28,52	48,89	22,75	17,37
9	7,79	11,05	29,02	48,04	23,06	17,37
10	7,79	11,05	29,18	48,04	23,19	17,37
11	7,79	11,05	29,27	48,04	23,37	17,37
12	7,79	11,05	29,53	47,49	23,50	17,37
13	7,79	11,05	29,87	46,94	23,81	17,37
14	7,79	11,05	30,23	46,94	23,87	17,37
15	7,79	11,05	30,14	46,53	24,06	17,37
16	7,79	11,05	30,41	45,72	24,19	17,37
17	7,79	11,05	30,50	45,85	24,25	17,37
18	7,71	11,05	30,68	45,72	24,31	17,37
19	7,71	11,05	30,50	45,18	24,44	17,37
20	7,71	11,05	30,86	44,53	24,56	17,37
21	7,71	11,05	30,86	44,14	24,62	17,37
22	7,64	11,05	30,77	44,00	24,62	17,37
23	7,64	11,05	31,04	43,87	24,69	17,37
24	7,64	11,05	30,95	43,62	24,69	17,37
25	7,64	11,05	30,86	43,49	24,69	17,37

Nº CORRIDAS	F.CAL (LPM)	F. FRÍO (LPM)	FLUIDO CALIENTE		FLUIDO FRÍO	
			SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA
1	5,71	5,71	29,70	49,03	26,44	17,56
2	5,71	5,71	29,79	48,60	26,62	17,56
3	5,71	5,71	29,87	49,03	26,81	17,56
4	5,71	5,71	29,88	48,60	27,00	17,56
5	5,71	5,71	30,50	48,04	27,50	17,56
6	5,71	5,71	30,59	48,46	27,62	17,56
7	5,71	5,71	30,59	48,04	27,94	17,56

8	5,71	5,71	30,68	49,05	28,00	17,56
9	5,71	5,71	30,77	47,77	28,25	17,56
10	5,71	5,71	30,95	48,04	28,31	17,56
11	5,71	5,71	30,95	48,47	28,37	17,56
12	5,71	5,71	30,86	47,90	28,50	17,56
13	5,71	5,71	31,13	47,77	28,62	17,56
14	5,71	5,71	31,23	47,63	28,69	17,56
15	5,71	5,71	31,32	46,95	28,75	17,56
16	5,71	5,71	31,23	47,21	28,81	17,56
17	5,71	5,71	31,04	47,49	28,87	17,56
18	5,71	5,71	31,23	47,35	28,87	17,56
19	5,71	5,71	31,23	47,49	29,00	17,56
20	5,71	5,71	31,13	47,49	29,00	17,56
21	5,71	5,71	31,32	47,21	29,06	17,56
22	5,71	5,71	31,32	46,80	29,12	17,56
23	5,71	5,71	31,41	46,80	29,19	17,56
24	5,71	5,71	31,32	46,94	29,19	17,56
25	5,71	5,71	31,41	46,94	29,25	17,56
26	5,71	5,71	31,50	46,53	29,25	17,56
27	5,71	5,71	31,32	46,80	29,25	17,56
28	5,71	5,71	31,32	46,80	29,31	17,56
29	5,71	5,71	31,32	46,53	29,31	17,56
30	5,71	5,71	31,32	46,39	29,31	17,56
31	5,71	5,71	31,41	46,66	29,31	17,56
32	5,71	5,71	31,69	46,12	29,31	17,56
33	5,71	5,71	31,60	46,26	29,31	17,56

Tabla A2 (b) Datos tomados en flujo paralelo

Nº CORRIDAS	F.CAL (LPM)	F. FRÍO (LPM)	FLUIDO CALIENTE		FLUIDO FRÍO	
			SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA
1	5,71	5,71	28,85	48,61	25,06	17,04
2	5,71	5,71	29,02	48,6	25,25	17,06
3	5,71	5,71	29,27	48,46	25,37	17,06
4	5,71	5,71	28,04	46,76	25,5	17,06
5	5,71	5,71	29,96	48,04	25,81	17,06
6	5,71	5,71	29,88	47,63	25,94	17,06
7	5,71	5,71	30,41	48,04	26,06	17,06
8	5,71	5,71	30,41	48,04	26,12	17,06
9	5,71	5,71	30,86	47,77	26,19	17,06
10	5,71	5,71	30,59	47,63	26,25	17,06
11	5,71	5,71	30,59	47,9	26,25	17,06
12	5,71	5,71	30,77	47,77	26,31	17,06
13	5,71	5,71	30,59	47,49	26,31	17,06
14	5,71	5,71	30,95	47,49	26,31	17,06
15	5,71	5,71	30,95	48,05	26,37	17,06
16	5,71	5,71	31,04	47,35	26,37	17,06
17	5,71	5,71	31,32	47,91	26,37	17,06
18	5,71	5,71	31,32	47,08	26,37	17,06
19	5,71	5,71	30,00	47,21	26,37	17,06
20	5,71	5,71	31,6	47,21	26,37	17,06
21	5,71	5,71	31,32	46,53	26,31	17,06
22	5,71	5,71	31,23	47,07	26,31	17,06
23	5,71	5,71	31,69	46,94	26,31	17,06
24	5,71	5,71	31,32	46,94	26,25	17,06
25	5,71	5,71	31,23	46,8	26,25	17,06
26	5,71	5,71	31,41	46,94	26,25	17,06
27	5,71	5,71	31,23	46,39	26,25	17,06
28	5,71	5,71	31,5	46,66	26,25	17,06
29	5,71	5,71	31,41	46,82	26,19	17,06
30	5,71	5,71	31,23	46,39	26,19	17,06
31	5,71	5,71	31,5	45,72	26,06	17,06
32	5,71	5,71	31,5	45,85	26,00	17,06
33	5,71	5,71	31,5	45,58	25,94	17,06

Anexo 3 Cálculos realizados en la evaluación del intercambiador de calor

Tabla A3 (a) Propiedades físicas del fluido a contracorriente

CONTRACORRIENTE					
$g_{cal.}, LPM$	$g_{frio.}, LPM$	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$
5,71	5,71	49,03	29,7	17,56	26,44
5,71	5,71	48,6	29,79	17,56	26,62
5,71	5,71	49,03	29,87	17,56	26,81
5,71	5,71	48,6	29,88	17,56	27,00
5,71	5,71	48,04	30,5	17,56	27,5
5,71	5,71	48,46	30,59	17,56	27,62
5,71	5,71	48,04	30,59	17,56	27,94
5,71	5,71	49,05	30,68	17,56	28,00
5,71	5,71	47,77	30,77	17,56	28,25
5,71	5,71	48,04	30,95	17,56	28,31
5,71	5,71	48,47	30,95	17,56	28,37
5,71	5,71	47,90	30,86	17,56	28,5
5,71	5,71	47,77	31,13	17,56	28,62
5,71	5,71	47,63	31,23	17,56	28,69
5,71	5,71	46,95	31,32	17,56	28,75
5,71	5,71	47,21	31,23	17,56	28,81
5,71	5,71	47,49	31,04	17,56	28,87
5,71	5,71	47,35	31,23	17,56	28,87
5,71	5,71	47,49	31,23	17,56	29,00
5,71	5,71	47,49	31,13	17,56	29,00
5,71	5,71	47,21	31,32	17,56	29,06
5,71	5,71	46,80	31,32	17,56	29,12
5,71	5,71	46,80	31,41	17,56	29,19
5,71	5,71	46,94	31,32	17,56	29,19
5,71	5,71	46,94	31,41	17,56	29,25
5,71	5,71	46,53	31,5	17,56	29,25
5,71	5,71	46,80	31,32	17,56	29,25
5,71	5,71	46,80	31,32	17,56	29,31
5,71	5,71	46,53	31,32	17,56	29,31
5,71	5,71	46,39	31,32	17,56	29,31
5,71	5,71	46,66	31,41	17,56	29,31
5,71	5,71	46,12	31,69	17,56	29,31
5,71	5,71	46,26	31,60	17,56	29,31

CONTRACORRIENTE							
Fluido caliente		$\bar{T}, ^\circ C$	$\rho, kg/m^3$	$C_p, J/kg^\circ C$	$\mu, kg/m.s$	$k, W/m.^\circ C$	Pr
$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$						
49,03	29,7	39,37	992,37	4179,34	6,0484E-04	0,5273	4,79
48,6	29,79	39,20	992,44	4179,37	6,0644E-04	0,5276	4,80
49,03	29,87	39,45	992,34	4179,33	6,0404E-04	0,5272	4,79
48,6	29,88	39,24	992,42	4179,37	6,0602E-04	0,5275	4,80
48,04	30,5	39,27	992,41	4179,36	6,0573E-04	0,5275	4,80
48,46	30,59	39,53	992,31	4179,32	6,0334E-04	0,5271	4,78
48,04	30,59	39,32	992,39	4179,35	6,0531E-04	0,5274	4,80
49,05	30,68	39,87	992,18	4179,26	6,0017E-04	0,5267	4,76
47,77	30,77	39,27	992,41	4179,36	6,0573E-04	0,5275	4,80
48,04	30,95	39,50	992,32	4179,32	6,0362E-04	0,5272	4,79
48,47	30,95	39,71	992,24	4179,29	6,0162E-04	0,5269	4,77
47,9	30,86	39,38	992,37	4179,34	6,0470E-04	0,5273	4,79
47,77	31,13	39,45	992,34	4179,33	6,0404E-04	0,5272	4,79
47,63	31,23	39,43	992,35	4179,33	6,0423E-04	0,5273	4,79
46,95	31,32	39,14	992,46	4179,38	6,0701E-04	0,5276	4,81
47,21	31,23	39,22	992,43	4179,37	6,0620E-04	0,5275	4,80
47,49	31,04	39,27	992,41	4179,36	6,0578E-04	0,5275	4,80
47,35	31,23	39,29	992,40	4179,36	6,0555E-04	0,5274	4,80
47,49	31,23	39,36	992,37	4179,35	6,0489E-04	0,5273	4,79
47,49	31,13	39,31	992,39	4179,35	6,0536E-04	0,5274	4,80
47,21	31,32	39,27	992,41	4179,36	6,0578E-04	0,5275	4,80
46,8	31,32	39,06	992,49	4179,40	6,0771E-04	0,5277	4,81
46,8	31,41	39,11	992,47	4179,39	6,0729E-04	0,5277	4,81
46,94	31,32	39,13	992,46	4179,39	6,0705E-04	0,5276	4,81
46,94	31,41	39,18	992,44	4179,38	6,0663E-04	0,5276	4,81
46,53	31,5	39,02	992,50	4179,41	6,0814E-04	0,5278	4,82
46,8	31,32	39,06	992,49	4179,40	6,0771E-04	0,5277	4,81
46,8	31,32	39,06	992,49	4179,40	6,0771E-04	0,5277	4,81
46,53	31,32	38,93	992,54	4179,42	6,0899E-04	0,5279	4,82
46,39	31,32	38,86	992,56	4179,43	6,0966E-04	0,5280	4,83
46,66	31,41	39,04	992,49	4179,40	6,0795E-04	0,5278	4,81
46,12	31,69	38,91	992,54	4179,43	6,0918E-04	0,5279	4,82
46,26	31,6	38,93	992,53	4179,42	6,0894E-04	0,5279	4,82

CONTRACORRIENTE							
Fluido frio		$\bar{t}, ^\circ C$	$\rho, kg/m^3$	$C_p, J/kg^\circ C$	$\mu, kg/m.s$	$k, W/m.^\circ C$	Pr
$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$						
17,56	26,44	22,00	997,67	4186,88	8,0457E-04	0,5495	6,13
17,56	26,62	22,09	997,64	4186,81	8,0331E-04	0,5494	6,12
17,56	26,81	22,19	997,62	4186,75	8,0199E-04	0,5493	6,11
17,56	27	22,28	997,60	4186,68	8,0066E-04	0,5492	6,10
17,56	27,5	22,53	997,54	4186,51	7,9720E-04	0,5489	6,08
17,56	27,62	22,59	997,53	4186,47	7,9637E-04	0,5488	6,08
17,56	27,94	22,75	997,49	4186,36	7,9417E-04	0,5486	6,06
17,56	28	22,78	997,48	4186,34	7,9375E-04	0,5485	6,06
17,56	28,25	22,91	997,45	4186,26	7,9204E-04	0,5484	6,05
17,56	28,31	22,94	997,45	4186,24	7,9163E-04	0,5483	6,04
17,56	28,37	22,97	997,44	4186,22	7,9122E-04	0,5483	6,04
17,56	28,5	23,03	997,42	4186,17	7,9033E-04	0,5482	6,03
17,56	28,62	23,09	997,41	4186,13	7,8951E-04	0,5481	6,03
17,56	28,69	23,13	997,40	4186,11	7,8903E-04	0,5481	6,03
17,56	28,75	23,16	997,39	4186,09	7,8863E-04	0,5481	6,02
17,56	28,81	23,19	997,39	4186,07	7,8822E-04	0,5480	6,02
17,56	28,87	23,22	997,38	4186,05	7,8781E-04	0,5480	6,02
17,56	28,87	23,22	997,38	4186,05	7,8781E-04	0,5480	6,02
17,56	29	23,28	997,36	4186,01	7,8693E-04	0,5479	6,01
17,56	29	23,28	997,36	4186,01	7,8693E-04	0,5479	6,01
17,56	29,06	23,31	997,36	4185,99	7,8652E-04	0,5479	6,01
17,56	29,12	23,34	997,35	4185,97	7,8611E-04	0,5478	6,01
17,56	29,19	23,38	997,34	4185,94	7,8564E-04	0,5478	6,00
17,56	29,19	23,38	997,34	4185,94	7,8564E-04	0,5478	6,00
17,56	29,25	23,41	997,33	4185,92	7,8523E-04	0,5477	6,00
17,56	29,25	23,41	997,33	4185,92	7,8523E-04	0,5477	6,00
17,56	29,25	23,41	997,33	4185,92	7,8523E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00
17,56	29,31	23,44	997,33	4185,91	7,8483E-04	0,5477	6,00

Tabla A3 (b) Cálculo de Carga térmica y calor perdido

CONTRACORRIENTE				
$g_{cal.}, LPM$	$g_{frio.}, LPM$	$Q_{cal.}, W$	Q_{frio}, W	$Q_{perd.}, W$
5,71	5,71	7629,56	3529,98	4099,57
5,71	5,71	7424,84	3601,41	3823,43
5,71	5,71	7562,19	3676,80	3885,39
5,71	5,71	7389,17	3752,18	3637,00
5,71	5,71	6923,32	3950,53	2972,79
5,71	5,71	7052,82	3998,12	3054,70
5,71	5,71	6887,66	4125,04	2762,63
5,71	5,71	7249,13	4148,83	3100,30
5,71	5,71	6710,17	4247,97	2462,20
5,71	5,71	6745,06	4271,76	2473,30
5,71	5,71	6914,15	4295,55	2618,60
5,71	5,71	6725,65	4347,10	2378,55
5,71	5,71	6567,58	4394,68	2172,90
5,71	5,71	6472,91	4422,43	2050,48
5,71	5,71	6169,76	4446,22	1723,54
5,71	5,71	6307,69	4470,00	1837,69
5,71	5,71	6493,09	4493,79	1999,30
5,71	5,71	6362,77	4493,79	1868,98
5,71	5,71	6417,84	4545,32	1872,52
5,71	5,71	6457,44	4545,32	1912,12
5,71	5,71	6272,05	4569,11	1702,94
5,71	5,71	6110,74	4592,89	1517,85
5,71	5,71	6075,10	4620,64	1454,46
5,71	5,71	6165,82	4620,64	1545,18
5,71	5,71	6130,18	4644,42	1485,76
5,71	5,71	5933,21	4644,42	1288,79
5,71	5,71	6110,74	4644,42	1466,32
5,71	5,71	6110,74	4668,20	1442,53
5,71	5,71	6004,49	4668,20	1336,29
5,71	5,71	5949,40	4668,20	1281,20
5,71	5,71	6020,01	4668,20	1351,80
5,71	5,71	5696,62	4668,20	1028,42
5,71	5,71	5787,36	4668,20	1119,15

Tabla A3 (c) Cálculo del coeficiente global

CONTRACORRIENTE								
$\mathcal{G}_{cal.}$ LPM	$\mathcal{G}_{frio.}$ LPM	TMLD °C	G_t kg / s	G_s kg / s	v_t m / s	v_s m / s	Re_s	J_{Hs}
5,71	5,71	16,83	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14804,76	4,6836E-03
5,71	5,71	16,63	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14827,65	4,6801E-03
5,71	5,71	16,78	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14851,83	4,6764E-03
5,71	5,71	16,53	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14876,03	4,6727E-03
5,71	5,71	16,45	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14939,83	4,6630E-03
5,71	5,71	16,63	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14955,16	4,6606E-03
5,71	5,71	16,31	0,0944	0,0949	1,48	1,18	14996,10	4,6544E-03
5,71	5,71	16,77	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15003,78	4,6533E-03
5,71	5,71	16,16	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15035,82	4,6484E-03
5,71	5,71	16,36	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15043,51	4,6473E-03
5,71	5,71	16,52	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15051,21	4,6461E-03
5,71	5,71	16,16	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15067,89	4,6436E-03
5,71	5,71	16,20	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15083,30	4,6413E-03
5,71	5,71	16,16	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15092,29	4,6400E-03
5,71	5,71	15,88	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15100,00	4,6388E-03
5,71	5,71	15,92	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15107,72	4,6377E-03
5,71	5,71	15,91	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15115,43	4,6365E-03
5,71	5,71	15,95	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15115,43	4,6365E-03
5,71	5,71	15,96	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15132,16	4,6340E-03
5,71	5,71	15,90	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15132,16	4,6340E-03
5,71	5,71	15,85	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15139,88	4,6329E-03
5,71	5,71	15,64	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15147,60	4,6317E-03
5,71	5,71	15,65	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15156,62	4,6304E-03
5,71	5,71	15,67	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15156,62	4,6304E-03
5,71	5,71	15,69	0,0944	0,0949	1,48	1,18	15164,34	4,6292E-03
5,71	5,71	15,55	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15164,34	4,6292E-03
5,71	5,71	15,58	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15164,34	4,6292E-03
5,71	5,71	15,55	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03
5,71	5,71	15,43	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03
5,71	5,71	15,36	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03
5,71	5,71	15,53	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03
5,71	5,71	15,43	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03
5,71	5,71	15,45	0,0945	0,0949	1,48	1,18	15172,08	4,6281E-03

CONTRACORRIENTE						
$g_{cal.}$	$g_{frio.}$					
<i>LPM</i>	<i>LPM</i>	$h_i, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$h_s, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$U_t, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$U_{exp}, W / m^2 \cdot ^\circ C$	ε
5,71	5,71	11788,33	6843,17	3834,93	2367,47	45,94
5,71	5,71	11769,58	6844,07	3832,71	2443,88	48,17
5,71	5,71	11797,71	6845,01	3836,75	2472,92	48,28
5,71	5,71	11774,54	6845,95	3833,96	2562,11	50,43
5,71	5,71	11777,85	6848,42	3835,18	2710,61	56,67
5,71	5,71	11805,98	6849,01	3839,11	2713,23	56,30
5,71	5,71	11782,82	6850,58	3836,52	2854,29	59,48
5,71	5,71	11843,49	6850,88	3844,69	2791,46	56,83
5,71	5,71	11777,85	6852,10	3836,33	2966,68	62,88
5,71	5,71	11802,67	6852,40	3839,74	2947,63	62,90
5,71	5,71	11826,39	6852,69	3842,98	2934,84	61,70
5,71	5,71	11789,99	6853,33	3838,34	3036,21	64,20
5,71	5,71	11797,71	6853,91	3839,55	3061,56	66,47
5,71	5,71	11795,50	6854,25	3839,36	3088,16	67,87
5,71	5,71	11762,96	6854,55	3835,11	3160,58	71,59
5,71	5,71	11772,34	6854,84	3836,45	3169,23	70,40
5,71	5,71	11777,30	6855,13	3837,21	3187,33	68,75
5,71	5,71	11780,06	6855,13	3837,58	3178,84	70,16
5,71	5,71	11787,78	6855,76	3838,81	3214,39	70,36
5,71	5,71	11782,27	6855,76	3838,07	3225,61	69,93
5,71	5,71	11777,30	6856,05	3837,50	3252,61	72,37
5,71	5,71	11754,69	6856,35	3834,56	3314,63	74,68
5,71	5,71	11759,65	6856,69	3835,33	3331,11	75,57
5,71	5,71	11762,41	6856,69	3835,70	3327,79	74,46
5,71	5,71	11767,37	6856,98	3836,46	3340,37	75,27
5,71	5,71	11749,72	6856,98	3834,09	3370,77	77,78
5,71	5,71	11754,69	6856,98	3834,76	3364,72	75,52
5,71	5,71	11754,69	6857,27	3834,85	3387,98	75,90
5,71	5,71	11739,80	6857,27	3832,85	3415,46	77,25
5,71	5,71	11732,08	6857,27	3831,82	3429,94	77,97
5,71	5,71	11751,93	6857,27	3834,48	3391,50	77,05
5,71	5,71	11737,59	6857,27	3832,56	3414,16	81,43
5,71	5,71	11740,35	6857,27	3832,93	3410,16	80,15

Tabla A3 (d) Propiedades físicas del fluido en paralelo

PARALELO					
$\mathcal{G}_{cal.}, LPM$	$\mathcal{G}_{frio.}, LPM$	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$t_1, ^\circ C$
5,71	5,71	48,61	28,85	25,06	17,04
5,71	5,71	48,6	29,02	25,25	17,06
5,71	5,71	48,46	29,27	25,37	17,06
5,71	5,71	46,76	28,04	25,5	17,06
5,71	5,71	48,04	29,96	25,81	17,06
5,71	5,71	47,63	29,88	25,94	17,06
5,71	5,71	48,04	30,41	26,06	17,06
5,71	5,71	48,04	30,41	26,12	17,06
5,71	5,71	47,77	30,86	26,19	17,06
5,71	5,71	47,63	30,59	26,25	17,06
5,71	5,71	47,9	30,59	26,25	17,06
5,71	5,71	47,77	30,77	26,31	17,06
5,71	5,71	47,49	30,59	26,31	17,06
5,71	5,71	47,49	30,95	26,31	17,06
5,71	5,71	48,05	30,95	26,37	17,06
5,71	5,71	47,35	31,04	26,37	17,06
5,71	5,71	47,91	31,32	26,37	17,06
5,71	5,71	47,08	31,32	26,37	17,06
5,71	5,71	47,21	30,00	26,37	17,06
5,71	5,71	47,21	31,60	26,37	17,06
5,71	5,71	46,53	31,32	26,31	17,06
5,71	5,71	47,07	31,23	26,31	17,06
5,71	5,71	46,94	31,69	26,31	17,06
5,71	5,71	46,94	31,32	26,25	17,06
5,71	5,71	46,8	31,23	26,25	17,06
5,71	5,71	46,94	31,41	26,25	17,06
5,71	5,71	46,39	31,23	26,25	17,06
5,71	5,71	46,66	31,5	26,25	17,06
5,71	5,71	46,82	31,41	26,19	17,06
5,71	5,71	46,39	31,23	26,19	17,06
5,71	5,71	45,72	31,5	26,06	17,06
5,71	5,71	45,85	31,5	26	17,06
5,71	5,71	45,58	31,5	25,94	17,06

PARALELO							
Fluido caliente		$\bar{T}, ^\circ C$	$\rho, kg / m^3$	$Cp, J / kg^\circ C$	$\mu, kg / m.s$	$k, W / m.^\circ C$	Pr
$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$						
48,61	28,85	38,73	992,61	4179,46	6,1084E-04	0,5282	4,83
48,6	29,02	38,81	992,58	4179,44	6,1008E-04	0,5281	4,83
48,46	29,27	38,87	992,56	4179,43	6,0956E-04	0,5280	4,83
46,76	28,04	37,40	993,09	4179,74	6,2369E-04	0,5299	4,92
48,04	29,96	39,00	992,51	4179,41	6,0828E-04	0,5278	4,82
47,63	29,88	38,76	992,60	4179,45	6,1061E-04	0,5281	4,83
48,04	30,41	39,23	992,42	4179,37	6,0616E-04	0,5275	4,80
48,04	30,41	39,23	992,42	4179,37	6,0616E-04	0,5275	4,80
47,77	30,86	39,32	992,39	4179,35	6,0531E-04	0,5274	4,80
47,63	30,59	39,11	992,47	4179,39	6,0724E-04	0,5277	4,81
47,9	30,59	39,25	992,42	4179,37	6,0597E-04	0,5275	4,80
47,77	30,77	39,27	992,41	4179,36	6,0573E-04	0,5275	4,80
47,49	30,59	39,04	992,49	4179,40	6,0790E-04	0,5278	4,81
47,49	30,95	39,22	992,43	4179,37	6,0620E-04	0,5275	4,80
48,05	30,95	39,50	992,32	4179,32	6,0358E-04	0,5272	4,79
47,35	31,04	39,20	992,44	4179,37	6,0644E-04	0,5276	4,80
47,91	31,32	39,62	992,28	4179,30	6,0250E-04	0,5270	4,78
47,08	31,32	39,20	992,43	4179,37	6,0639E-04	0,5276	4,80
47,21	30	38,61	992,65	4179,48	6,1203E-04	0,5283	4,84
47,21	31,6	39,41	992,36	4179,34	6,0447E-04	0,5273	4,79
46,53	31,32	38,93	992,54	4179,42	6,0899E-04	0,5279	4,82
47,07	31,23	39,15	992,45	4179,38	6,0686E-04	0,5276	4,81
46,94	31,69	39,32	992,39	4179,35	6,0531E-04	0,5274	4,80
46,94	31,32	39,13	992,46	4179,39	6,0705E-04	0,5276	4,81
46,8	31,23	39,02	992,50	4179,41	6,0814E-04	0,5278	4,82
46,94	31,41	39,18	992,44	4179,38	6,0663E-04	0,5276	4,81
46,39	31,23	38,81	992,58	4179,44	6,1008E-04	0,5281	4,83
46,66	31,5	39,08	992,48	4179,39	6,0752E-04	0,5277	4,81
46,82	31,41	39,12	992,47	4179,39	6,0719E-04	0,5277	4,81
46,39	31,23	38,81	992,58	4179,44	6,1008E-04	0,5281	4,83
45,72	31,5	38,61	992,65	4179,48	6,1199E-04	0,5283	4,84
45,85	31,5	38,68	992,63	4179,47	6,1137E-04	0,5282	4,84
45,58	31,5	38,54	992,68	4179,49	6,1266E-04	0,5284	4,85

PARALELO							
Fluido frio		$\bar{t}, ^\circ C$	$\rho, kg / m^3$	$Cp, J / kg^\circ C$	$\mu, kg / m.s$	$k, W / m.^\circ C$	Pr
$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$						
25,06	17,06	21,06	997,88	4187,55	8,1788E-04	0,5507	6,22
25,25	17,06	21,16	997,85	4187,48	8,1652E-04	0,5506	6,21
25,37	17,06	21,22	997,84	4187,43	8,1567E-04	0,5505	6,20
25,5	17,06	21,28	997,83	4187,39	8,1474E-04	0,5505	6,20
25,81	17,06	21,44	997,79	4187,28	8,1253E-04	0,5503	6,18
25,94	17,06	21,50	997,78	4187,23	8,1161E-04	0,5502	6,18
26,06	17,06	21,56	997,76	4187,19	8,1076E-04	0,5501	6,17
26,12	17,06	21,59	997,76	4187,17	8,1034E-04	0,5501	6,17
26,19	17,06	21,63	997,75	4187,14	8,0984E-04	0,5500	6,17
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,37	17,06	21,72	997,73	4187,08	8,0857E-04	0,5499	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,31	17,06	21,69	997,74	4187,10	8,0900E-04	0,5499	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,25	17,06	21,66	997,74	4187,12	8,0942E-04	0,5500	6,16
26,19	17,06	21,63	997,75	4187,14	8,0984E-04	0,5500	6,17
26,19	17,06	21,63	997,75	4187,14	8,0984E-04	0,5500	6,17
26,06	17,06	21,56	997,76	4187,19	8,1076E-04	0,5501	6,17
26	17,06	21,53	997,77	4187,21	8,1119E-04	0,5501	6,17
25,94	17,06	21,50	997,78	4187,23	8,1161E-04	0,5502	6,18

Tabla A3 (e) Cálculo de Carga térmica y calor perdido

PARALELO				
$\mathcal{Q}_{cal.}, LPM$	$\mathcal{Q}_{frio.}, LPM$	$Q_{cal.}, W$	Q_{frio}, W	$Q_{perd.}, W$
5,71	5,71	7801,35	3189,31	4612,03
5,71	5,71	7730,02	3256,78	4473,24
5,71	5,71	7575,88	3304,42	4271,46
5,71	5,71	7394,85	3356,03	4038,82
5,71	5,71	7137,27	3479,08	3658,19
5,71	5,71	7007,71	3530,68	3477,03
5,71	5,71	6958,97	3578,31	3380,66
5,71	5,71	6958,97	3602,12	3356,85
5,71	5,71	6674,52	3629,90	3044,62
5,71	5,71	6726,41	3653,71	3072,70
5,71	5,71	6832,60	3653,71	3178,89
5,71	5,71	6710,17	3677,52	3032,65
5,71	5,71	6671,34	3677,52	2993,82
5,71	5,71	6528,74	3677,52	2851,21
5,71	5,71	6748,99	3701,33	3047,66
5,71	5,71	6438,02	3701,33	2736,68
5,71	5,71	6547,39	3701,33	2846,06
5,71	5,71	6220,90	3701,33	2519,57
5,71	5,71	6794,95	3701,33	3093,61
5,71	5,71	6161,17	3701,33	2459,83
5,71	5,71	6004,49	3677,52	2326,97
5,71	5,71	6252,61	3677,52	2575,09
5,71	5,71	6019,30	3677,52	2341,78
5,71	5,71	6165,82	3653,71	2512,11
5,71	5,71	6146,38	3653,71	2492,67
5,71	5,71	6130,18	3653,71	2476,47
5,71	5,71	5985,04	3653,71	2331,33
5,71	5,71	5984,37	3653,71	2330,65
5,71	5,71	6082,97	3629,90	2453,06
5,71	5,71	5985,04	3629,90	2355,14
5,71	5,71	5614,41	3578,31	2036,10
5,71	5,71	5665,58	3554,50	2111,09
5,71	5,71	5559,29	3530,68	2028,61

Tabla A3 (f). Cálculo del coeficiente global

PARALELO								
$g_{cat.}$ LPM	$g_{frio.}$ LPM	TMLD °C	G_t kg / s	G_s kg / s	v_t m / s	v_s m / s	Re_s	J_{Hs}
5,71	5,71	13,10	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14564,39	4,7211E-03
5,71	5,71	13,07	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14590,85	4,7169E-03
5,71	5,71	13,18	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14605,98	4,7146E-03
5,71	5,71	11,05	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14622,38	4,7120E-03
5,71	5,71	13,35	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14661,53	4,7059E-03
5,71	5,71	13,00	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14677,97	4,7033E-03
5,71	5,71	13,56	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14693,15	4,7009E-03
5,71	5,71	13,50	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14700,75	4,6997E-03
5,71	5,71	13,83	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14709,61	4,6984E-03
5,71	5,71	13,44	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	13,51	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	13,60	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	13,33	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	13,71	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	13,81	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	13,70	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	14,15	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	13,91	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	12,53	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	14,23	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14732,41	4,6948E-03
5,71	5,71	13,80	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	13,88	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	14,29	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14724,81	4,6960E-03
5,71	5,71	13,99	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	13,86	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	14,08	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	13,73	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	14,08	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14717,21	4,6972E-03
5,71	5,71	14,10	0,0944	0,0950	1,48	1,18	14709,61	4,6984E-03
5,71	5,71	13,79	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14709,61	4,6984E-03
5,71	5,71	13,97	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14693,15	4,7009E-03
5,71	5,71	14,07	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14685,56	4,7021E-03
5,71	5,71	14,04	0,0945	0,0950	1,48	1,18	14677,97	4,7033E-03

PARALELO						
$g_{cat.}$ LPM	$g_{frio.}$ LPM	$h_i, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$h_s, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$U_t, W / m^2 \cdot ^\circ C$	$U_{exp}, W / m^2 \cdot ^\circ C$	ε
5,71	5,71	11718,29	6833,64	3822,58	2747,65	40,59
5,71	5,71	11727,11	6834,71	3824,10	2812,21	41,83
5,71	5,71	11733,18	6835,31	3825,10	2829,54	43,30
5,71	5,71	11571,57	6835,97	3803,50	3427,67	45,09
5,71	5,71	11748,07	6837,53	3827,78	2941,16	48,40
5,71	5,71	11721,04	6838,18	3824,37	3065,14	50,03
5,71	5,71	11772,89	6838,78	3831,49	2978,20	51,05
5,71	5,71	11772,89	6839,08	3831,59	3011,34	51,39
5,71	5,71	11782,82	6839,43	3833,02	2962,16	53,99
5,71	5,71	11760,20	6839,73	3830,10	3068,11	53,93
5,71	5,71	11775,10	6839,73	3832,08	3052,21	53,09
5,71	5,71	11777,85	6840,03	3832,55	3051,77	54,41
5,71	5,71	11752,48	6840,03	3829,16	3113,59	54,73
5,71	5,71	11772,34	6840,03	3831,81	3027,29	55,93
5,71	5,71	11803,23	6840,33	3836,02	3024,82	54,44
5,71	5,71	11769,58	6840,33	3831,54	3049,11	57,08
5,71	5,71	11815,91	6840,33	3837,70	2952,14	56,12
5,71	5,71	11770,13	6840,33	3831,61	3003,08	59,07
5,71	5,71	11704,50	6840,33	3822,82	3333,82	54,10
5,71	5,71	11792,75	6840,33	3834,62	2935,55	59,64
5,71	5,71	11739,80	6840,03	3827,46	3007,54	60,82
5,71	5,71	11764,62	6840,03	3830,78	2990,21	58,40
5,71	5,71	11782,82	6840,03	3833,21	2904,41	60,66
5,71	5,71	11762,41	6839,73	3830,39	2947,49	58,83
5,71	5,71	11749,72	6839,73	3828,70	2975,13	59,02
5,71	5,71	11767,37	6839,73	3831,05	2928,65	59,18
5,71	5,71	11727,11	6839,73	3825,67	3003,30	60,62
5,71	5,71	11756,89	6839,73	3829,65	2928,65	60,62
5,71	5,71	11760,76	6839,43	3830,08	2905,43	59,25
5,71	5,71	11727,11	6839,43	3825,58	2970,75	60,22
5,71	5,71	11705,05	6838,78	3822,41	2890,79	63,29
5,71	5,71	11712,22	6838,48	3823,28	2851,14	62,30
5,71	5,71	11697,33	6838,18	3821,19	2838,09	63,07

Anexo 4 Modelamiento del controlador

```
%Identificación
clc; clear; close all;
%Obtengo el valor de la velocidad de mi monitor serial en %seg
vel_motor_A =[28.19 28.52 28.52 28.52 28.52 28.52 28.52 28.43 28.43 28.60 28.52 28.35 28.52
28.43 28.52 28.60 28.60 28.60 28.68 28.60 28.85 28.93 28.60 28.76 29.02 28.93 28.61 28.93
29.10 29.02 29.54 29.18 29.36 29.27 29.27 29.36 29.36 29.53 29.79 29.53 29.70 29.53 29.79
29.88 29.70 29.79 29.87 29.79 29.88 29.79 29.87 29.88 30.14 30.14 30.05 30.32 30.05 30.23
30.23 30.32 30.23 30.41 30.32 30.23 30.50 30.14 30.59 30.50 30.59 30.50 30.59 30.41 30.59
30.59 30.59 30.68 30.68 30.77 30.77 30.50 30.77 30.86 30.95 30.95 30.77 30.95 31.04 31.13
30.95 30.86 31.61 31.04 31.13 31.32 31.51 31.23 31.32 31.23 31.04 31.13 31.23 31.13 31.32
31.32 31.23 31.23 31.32 31.23 31.32 31.13 31.50 31.79 31.32 31.50 31.32 31.41 31.50 31.41
31.69 31.50 31.32 31.60 31.50 31.69 31.69 31.79 31.50 31.60 31.69 31.60 31.41 32.07 31.79
31.69 31.79 31.60 31.79 31.60 31.88 31.69 31.98 31.98 32.07 32.07 31.98 32.07 32.17 32.17 32.46 32.07 32.07 32.65
31.60 31.88 32.09 31.88 31.98 32.07 32.07 31.98 32.07 32.17 32.17 32.46 32.07 32.07 32.65
32.26 32.26 32.75 32.36 32.07 32.75 32.26 32.17 32.84 32.36 32.17 32.65 32.36 32.75 32.36
32.84 32.07 32.84 33.14 32.36 32.84 32.55 32.84 32.26 32.94 32.46 33.04 32.75 32.94 32.75
32.94 32.94 32.84 32.55 32.94 32.65 32.75 32.94 32.94 32.94 33.04 32.75 33.04 33.14 33.14
33.04 32.94 32.84 33.04 33.14 33.14 32.84 32.94 32.94 33.14 33.04 33.24 33.04 33.34 33.14
32.85 33.14 33.14 32.57 33.14 33.04 32.94 33.14 33.14 33.14 33.04 33.24 33.34 33.24 33.14
33.14 33.04 33.24 33.24 33.04 33.24 33.24 33.24 33.04 33.34 33.14 33.04 33.14 33.14 33.24
33.24 33.24 33.24 33.24 33.14 33.14 33.24 33.14 33.14 33.14 33.24 33.14 33.24 33.44 33.34
33.24 33.24 33.24 33.34 33.24 33.64 33.24 33.14 33.24 33.24 33.24 33.24 32.56 33.24 33.14
33.44 33.24 33.24 33.24 33.24 33.44 33.34 33.44 33.24 33.14 33.24 33.74 33.24 33.14 33.24
33.24 33.14 33.75 33.34 33.24 33.34 33.44 33.24 33.34 33.14 33.04 33.04 33.14 33.44 33.34
33.24 33.14 33.04 33.44 33.24 33.04 33.54 33.64 33.35 33.44 33.34 32.95 33.34 33.24 33.24
33.44 33.34 33.34 33.24 33.44 33.24 33.44 33.24 33.24 33.44 33.34 33.44 33.44 33.34 33.44
33.24 33.34 33.34];
t=0:0.2:69;
```

Figure (1)

```
plot(t,vel_motor_A); %Con este gráfico obtengo la respuesta ante
un escalon
%y puedo obtener los datos para un modelamiento --> valor de b y
tau
grid minor
xlabel('tiempo',ylabel('grados/seg'))
title('Identificacion')

function [G]=ziegler2_fcn(w)
s=1i*w;
G=(17.29*s^2+0.08056*s+2.241e-
05)/(s^3+4.927*s^2+0.1003*s+0.0004404);

end

clear; close all; clc
% -----
% analisis en la frecuencia
% -----
w=0; dw=0.05;
while(1) % búsqueda límite en el que existe wu
    w=w+dw;
    g=ziegler2_fcn(w);
    if(imag(g)>0.0)
        break;
    end
end
```

```

end
w1=w-dw;
w2=w; % w 1< wu < w2
% -----
% encontrar wu utilizando el método de bisección
% -----
while(1)
    w=(w1+w2)/2;
    g1=ziegler2_fcn(w1);
    g=ziegler2_fcn(w);
    if(imag(g)*imag(g1)>0.0)
        w1=w;
    else
        w2=w;
    end
    if(abs(imag(g))<0.000001)
        break;
    end
end
% -----
% hallando la ultima frecuencia wu
% -----
wu=w;
pu=2*pi/wu;
ku=1/abs(ziegler2_fcn(wu));
% -----
% sintonia de controladores P, PI, PID
% -----
p_kcd=ku/2.0;
pi_kcd=ku/2.2; pi_tid=pu/1.2;
pid_kcd=ku/1.7; pid_tid=pu/2.0;
pid_tdd=pu/8.0;
fprintf('P: kcd=%6.3f \n',p_kcd);
fprintf('PI: kcd=%6.3f, tid=%6.3f \n',pi_kcd,pi_tid);
fprintf('PID:                                kcdd=%6.3f,tid=%6.3f,
tdd=%6.3f\n',pid_kcd,pid_tid,pid_tdd);

P: kcd= 9.826
fprintf('PI: kcd=%6.3f, tid=%6.3f \n',pi_kcd,pi_tid);
PI: kcd= 8.933, tid=1756905951.110
fprintf('PID:                                kcdd=%6.3f,tid=%6.3f,
tdd=%6.3f\n',pid_kcd,pid_tid,pid_tdd);

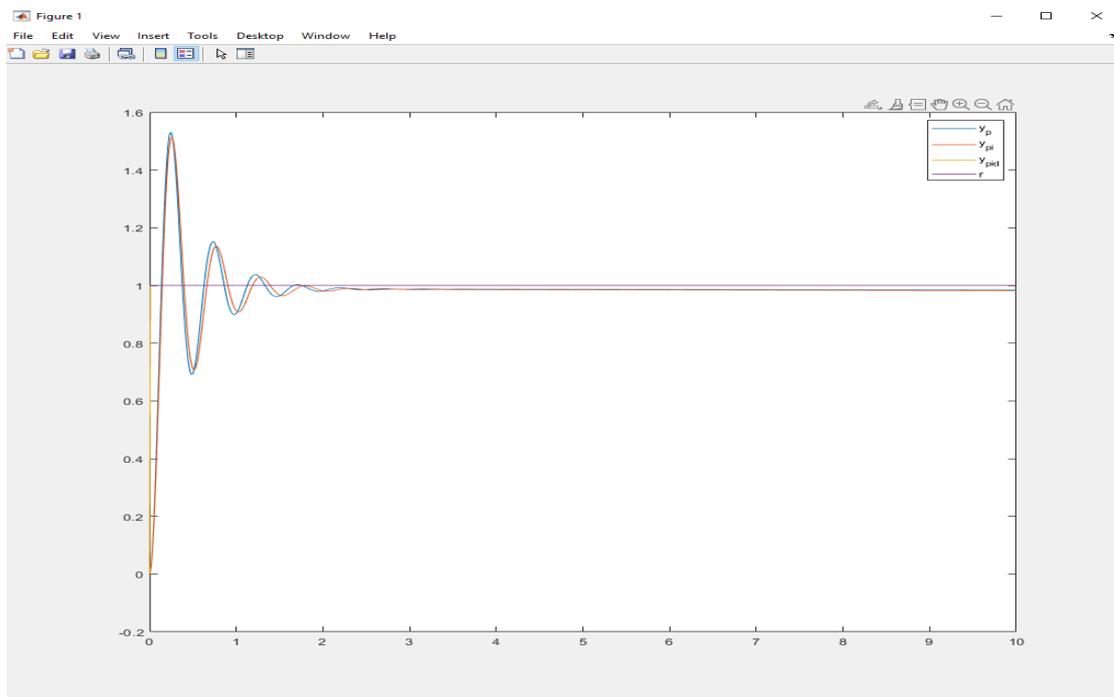
PID: kcdd=11.560,tid=1054143570.666, tdd=263535892.666
clear; close all; clc
% planta de tercer orden
Gp=tf([17.29 0.08056 -2.241e-05],[1 4.927 1.955 0.1003
0.0004404]);
% P
Kc=9.826;
% PI
kcd1=8.933;
tid1=1756905951.110;
% PID
kcd2=11.560;
tid2=1054143570.666;
tdd2=263535892.666;
% tiempo y referencia
t=0:0.01:10;
u=ones(size(t));
% Controlador P

```

```

Gcp=tf(Kc,1);
S1=series(Gcp,Gp);
F1=feedback(S1,1);
y1=lsim(F1,u,t);
% Controlador PI No Interactivo
Gcpi=tf([kcd1*tid1 kcd1],[tid1 0]);
S2=series(Gcpi,Gp);
F2=feedback(S2,1);
y2=lsim(F2,u,t);
% Controlador PID No Interactivo
Gcpid=tf([kcd2*tid2*tdd2 kcd2*tid2 kcd2],[tid2 0]);
S3=series(Gcpid,Gp);
F3=feedback(S3,1);
y3=lsim(F3,u,t);
% simulacion
plot(t,y1,t,y2,t,y3,t,u)
legend('y_p','y_{pi}','y_{pid}','r')

```



Anexo 5 Código de diseño

```

//PARA MEDIR LA TEMPERATURA
int temp1=A6;
int temp2=A1;
int temp3=A2;
int temp4=A3;
int ledpupm=31;
//STANDBY DEL TB6612FNG
#define STBY 8
//PARA CONTROLAR CON EL CONECTOR BOMBADE AGUA
#define PUMP_PWM 46
//PARA SENSOR DE CAUDAL
#define SENSOR_CAUDAL1 2
#define SENSOR_CAUDAL2 3
//Variables para el CAUDAL
volatile int count=0;
volatile int count1=0;
volatile double T_act_2 = 0;

```

```

volatile double T_ant_2 = 0;
volatile double Periodo_2 = 50;
//Variables globales
uint16_t PWM_resolucion = 250;
void setup() {
  Serial.begin(1000000);
  pinMode(PUMP_PWMA, OUTPUT);
  pinMode(STBY, OUTPUT);
  pinMode(ledpupm, OUTPUT);
  pinMode(SENSOR_CAUDAL1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(SENSOR_CAUDAL2, INPUT_PULLUP);
  //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCODER2_CH_A),
ISR_ENCODER_2, RISING); //Activamos la interrupcion por flanco de subida
en el canal A del encoder 2
  //XSpace_PWMinit(PWM_resolucion); //Configura los pin 46 como
salidas PWM de 400 de resolucion. La Frecuencia de la señal será
F_CPU/resolucion. F_CPU = 8000000
  //xTaskCreate(ControlDeTemperatura, "-", 600, NULL, 1, NULL);
//pump + temp1
  //vTaskStartScheduler();
}
void loop() {
  digitalWrite(ledpupm, HIGH);
  double vm = 24;
  //double kp = 0.0108;
  //double ki = 0.054;
  double kp = 0.002;
  double ki = 0.37;
  double Ts = 0.02;
  double ref = 40;
  double e = 0;
  double e_1 = 0;
  double u = 0;
  double u_1 = 0;
  double vel = 0;
  double t1=0;
  double t2=0;
  double t3=0;
  double t4=0;
  for (int i=0; i<4; i++){
    float t1r=analogRead(temp1);
    float t2r=analogRead(temp2);
    double t22=((0.0026*t2r*t2r)-(0.0242*t2r)+18.139);
    float t3r=analogRead(temp3);
    double t33=((0.0026*t3r*t3r)-(0.0242*t3r)+18.139);
    float t4r=analogRead(temp4);
    double t44=((0.0026*t4r*t4r)-(0.0242*t4r)+18.139);
    t2 = t22+t2;
    t3 = t33+t3;
    t4 = t44+t4;
    delay(50);
  }
  t2 = t2/4.0;
  t3 = t3/4.0;
  t4 = t4/4.0;

  while(1){
    e = ref - t3;
    u = u_1 + kp*e - kp*e_1 + ki*Ts/2*e + ki*Ts/2*e_1;
    u_1 = u;
    e_1 = e;
  }
}

```

```

        if(abs(u)>=24) u = 24;
        if(abs(u)<=0) u = 0;
        int Duty = (int) ((abs(u)/vm)*PWM_resolucion);
        analogWrite(PUMP_PWMA,Duty);
        Serial.print("0,30,");
        Serial.println(t2);
        Serial.println(Duty);
    }
}

```

(a) Código para la operación de modo manual

```

#include <pt.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "U8glib.h"
U8GLIB_ST7920_128X64 u8g (53, 49, 51, U8G_PIN_NONE);
struct pt hilo1;
struct pt hilo2;
struct pt hilo3;
// variables globales
static int ledresist=32;
static int ledpupm=31;
static int pump=46;

void setup() {
    pinMode(ledresist, OUTPUT);
    pinMode(ledpupm, OUTPUT);
    pinMode(pump,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);

    PT_INIT(&hilo1);
    PT_INIT(&hilo2);
    PT_INIT(&hilo3);
}
void loop() {

    level_control(&hilo3);
    modomanual(&hilo2);
    temp_analog(&hilo1);
    Serial.print(t2);
    Serial.print(t3);
    Serial.print(t4);
}
void modomanual(struct pt *pt) {
// modo manual

    PT_BEGIN(pt);
    // void setup() {
    // modo manual
int manual=30;
int pulsador1=28; // pulsador resistencia
int pulsador0=26;
int pulstate1, pulstate0;
int mantstate=LOW;
int pumpm=24; // resistencia encendido/papagado
int pumpmstate=LOW;
int pot =A0;

    pinMode(manual, INPUT);

```

```

pinMode(pumpm, INPUT);
pinMode(pulsador1, INPUT);
pinMode(pulsador0, INPUT);
pinMode(pot, INPUT);
// }

do {
  // void loop() {
  mantstate=digitalRead(manual);
if (mantstate == HIGH) {
  pulstate1=digitalRead(pulsador1);
  pulstate0=digitalRead(pulsador0);
  pumpmstate=digitalRead(pumpm);
  if (pulstate1 == HIGH){
    digitalWrite(ledresist,HIGH);
  }
  else if (pulstate0 == LOW) {
    digitalWrite(ledresist,LOW);
  }
  if (pumpmstate == HIGH){
    digitalWrite(ledpupm,HIGH);
    int intensd1=analogRead(pot);
    int intensd=map(intensd1,0,1024,0,255);
    analogWrite(pump,intensd);
    Serial.println(intensd1);
  }
  if (pumpmstate == LOW){
    digitalWrite(ledpupm,LOW);
  }
}
else {
  digitalWrite(ledresist,LOW);
  digitalWrite(ledpupm,LOW);
}
} while(true);
PT_END(pt);
}
void level_control(struct pt *pt) {

  PT_BEGIN(pt);
  int nivelalto=50;
  int nivelbajo=52;
  // void setup() {
  pinMode(36, INPUT_PULLUP); // entrada del level
  pinMode(nivelalto,OUTPUT);
  pinMode(34, INPUT_PULLUP); //entrada level
  pinMode(nivelbajo,OUTPUT);
  // }
  do {
  int leveldown = digitalRead(36);
  int levelup = digitalRead(34);
  if (levelup == 1){
    digitalWrite(nivelalto,LOW);
  }
  if (levelup == 0){
    digitalWrite(nivelalto,HIGH);
    //programar nivel alto
  }
  if (leveldown == 1){
    digitalWrite(nivelbajo,LOW);
  }
}

```

```

    if (leveldown == 0){
    digitalWrite(nivelbajo,HIGH);
    //PROGRAMAR APAGADOS
    }
    } while(true);
    PT_END(pt);
}
void temp_analog(struct pt *pt) {
    PT_BEGIN(pt);
    int temp2=A1;
    int temp3=A2;
    int temp4=A3;

    do {
        double t1=0;
    double t2=0;
    double t3=0;
    double t4=0;
        for (int i=0; i<4; i++){
    float t1l=analogRead(temp1);
    float t2r=analogRead(temp2);
    double t22=((0.0026*t2r*t2r)-(0.0242*t2r)+18.139);
    float t3r=analogRead(temp3);
    double t33=((0.0026*t3r*t3r)-(0.0242*t3r)+18.139);
    float t4r=analogRead(temp4);
    double t44=((0.0026*t4r*t4r)-(0.0242*t4r)+18.139);

    t2 = t22+t2;
    t3 = t33+t3;
    t4 = t44+t4;
    delay(500);
    }
    t2 = t2/4.0;
    t3 = t3/4.0;
    t4 = t4/4.0;
        } while(true);
    PT_END(pt);
}

```

(b) Código para el control automático del intercambiador de calor

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "U8glib.h"
//teclado librerias
#include <Keypad.h>
#include <string.h>

U8GLIB_ST7920_128X64 u8g (13, 11, 12, U8G_PIN_NONE);
//global variables
const int automatic=22;
int autstate=LOW;
int ledresist=32;
int pump=46;
int ledpump=31;
int nivelalto=50;
int nivelbajo=52;
//variables modo manual
const int manual=30;

```

```

int pulsador1=28; // pulsador resistencia
int pulsador0=26;
int pulstate1, pulstate0;
int mantstate=LOW;
int pumpm=24; // resistencia encendido/papagado
int pumpmstate=LOW;
int pot =A0;
int temp1=A0;
int temp2=A1;
int temp3=A2;
int temp4=A3;

int flowpin=2;
int flowpin1=3;
volatile int count=0;
volatile int count1=0;
double flowrate;
double flowratel;

OneWire ourWire1(44);
DallasTemperature sensors1(&ourWire1);
OneWire ourWire2(42);
DallasTemperature sensors2(&ourWire2);
//variables teclas
const byte FILAS = 4; // define numero de filas
const byte COLUMNAS = 3; // define numero de columnas
char keys[FILAS][COLUMNAS] = {
    {'1', '2', '3'},
    {'4', '5', '6'},
    {'7', '8', '9'},
    {' ', '0', '.'}
};
byte pinesFilas[] = {2,3,4,5};
byte pinesColumnas[] = {6,7,8};
Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(keys), pinesFilas, pinesColumnas,
FILAS, COLUMNAS);
String string, string1;
char TECLA;
char CLAVE[20]; // almacena en un array 6 digitos ingresados
byte INDICE = 0;
//fin de variables teclas
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    sensors1.begin();
    sensors2.begin();
    pinMode(36, INPUT_PULLUP); // entrada del level
    pinMode(nivelalto,OUTPUT);
    pinMode(34, INPUT_PULLUP); //entrada level
    pinMode(nivelbajo,OUTPUT);
    pinMode(ledresist,OUTPUT);
    pinMode(pump,OUTPUT);
    pinMode(ledpupm,OUTPUT);
    attachInterrupt(0, flow, RISING);
    attachInterrupt(1, flow1, RISING);
    //varivles de modo manual
    pinMode(automatic,INPUT);
    pinMode(manual,INPUT);
    pinMode(pumpm,INPUT);
    pinMode(pulsador1, INPUT);
    pinMode(pulsador0, INPUT);
    pinMode(pot, INPUT);

```

```

//variables botones
pinMode(47, INPUT_PULLUP);
//fin variables botones
u8g.firstPage();
do {
  text8();
  text9();
  text10();
  } while( u8g.nextPage() );
delay(10000);
clearLCD();
}
void loop() {
//tecaldo codigo
  TECLA = teclado.getKey();
  if (TECLA){
    CLAVE[INDICE] = TECLA;
    INDICE++;
    string=CLAVE;
    Serial.println(string);
    string1 = string.substring(0);
    if (INDICE == 4){
      INDICE=0;
    }
  }
  // fin teclado codigo
  autstate=digitalRead(automatic);

count =0;
count1 =0;
  interrupts();
  delay(2000);
  noInterrupts();
  flowrate=(0.0741598*count);
  flowrate1=(0.0741598*count1);
double t1=0;
double t2=0;
double t3=0;
double t4=0;
  for (int i=0; i<4; i++){
float t11=analogRead(temp1);
float t2r=analogRead(temp2);
double t22=((0.0026*t2r*t2r)-(0.0242*t2r)+18.139);
float t3r=analogRead(temp3);
double t33=((0.0026*t3r*t3r)-(0.0242*t3r)+18.139);
float t4r=analogRead(temp4);
double t44=((0.0026*t4r*t4r)-(0.0242*t4r)+18.139);

t2 = t22+t2;
t3 = t33+t3;
t4 = t44+t4;

delay(500);
}
t2 = t2/4.0;
t3 = t3/4.0;
t4 = t4/4.0;

  sensors1.requestTemperatures();
  float T1= sensors1.getTempCByIndex(0);
  sensors2.requestTemperatures();

```

```

float T2= sensors2.getTempCByIndex(0);
int leveldown = digitalRead(36); //level controler
int levelup = digitalRead(34);
if (levelup == 1){
  digitalWrite(nivelalto,LOW);
}
if (levelup == 0){
  digitalWrite(nivelalto,HIGH);
  //programar nivel alto
  digitalWrite(ledpupm,LOW);
  digitalWrite(ledresist,LOW);
}
if (leveldown == 1){
  digitalWrite(nivelbajo,LOW);
}
if (leveldown == 0){
  digitalWrite(nivelbajo,HIGH);
  //PROGRAMAR APAGADOS
  digitalWrite(ledpupm,LOW);
  digitalWrite(ledresist,LOW);
}
autstate=digitalRead(automatic);
if (autstate == HIGH) {
  int v=255;
  analogWrite(pump,v);
  digitalWrite(ledpupm,LOW); //
double set_Tk= 50;

  if (t2 > (set_Tk+0.5)){
    digitalWrite(ledresist,LOW);
  }
  if (t2 < (set_Tk-0.5)){
    digitalWrite(ledresist,HIGH);
  }
}

u8g.firstPage();
do {
  u8g.setFont(u8g_font_helvR08);
  u8g.drawStr( 0, 9,"T1=");
  u8g.setPrintPos(19,9);
  u8g.print(T1,1);
  u8g.drawCircle(48, 3, 2);
  u8g.drawStr( 51, 9,"C");

  u8g.drawStr( 0, 20,"T2=");
  u8g.setPrintPos(19,20);
  u8g.print(T2,1);
  u8g.drawCircle(48, 14, 2);
  u8g.drawStr( 51, 20,"C");

  u8g.drawStr( 0, 31,"T3=");
  u8g.setPrintPos(19,31);
  u8g.print(t4,1);
  u8g.drawCircle(48, 25, 2);
  u8g.drawStr( 51, 31,"C");
  u8g.drawLine(60, 0, 60, 64);
  u8g.drawStr( 0, 42,"T4=");
  u8g.setPrintPos(19,42);
  u8g.print(t3,1);
  u8g.drawCircle(48, 36, 2);

```

```

u8g.drawStr( 51, 42,"C");
u8g.drawStr( 64, 9,"Tk=");
u8g.setPrintPos(83,9);
u8g.print(t2,1);
u8g.drawCircle(112, 3, 2);
u8g.drawStr( 115, 9,"C");

u8g.drawStr( 64, 20,"Qh=");
u8g.setPrintPos(83,20);
u8g.print(Caudal11,2);

    u8g.drawStr( 0, 53,"Qc=");
u8g.setPrintPos(20,53);
u8g.print(Caudal22,2);

u8g.drawStr( 64, 42,"SP=");
u8g.setPrintPos(83,42);
u8g.print(string1);
u8g.drawCircle(112, 36, 2);
u8g.drawStr( 115, 42,"C");
    textlpm();
} while( u8g.nextPage() );

//código para la corrección del caudal en función de la temperatura
//y = 1E-05x2 + 0,0003x + 3,081
    Caudal11 = 0.00001*t3*t3+0.0003*t3+3.081;
    Caudal22 = 0.00001*t1*t1+0.0003*t1+3.081;
Serial.print("T1 = " );
Serial.println(T1);
    Serial.print("T2 = " );
Serial.println(T2);
    Serial.print("T3 = " );
Serial.println(t2);
    Serial.print("T4 = " );
Serial.println(t3);
    Serial.print("T5 = " );
Serial.println(t4);
    Serial.print("Qc = " );
Serial.println(flowrate);
Serial.print("Qh = " );
Serial.println(flowratel);
long t=millis();
Serial.println(t);
//modo manual
mantstate=digitalRead(manual);
if (mantstate == HIGH) {
    pulstatel=digitalRead(pulsador1);
    pulstate0=digitalRead(pulsador0);
    pumpmstate=digitalRead(pumpm);

    if (pulstatel == HIGH){
        digitalWrite(ledresist,HIGH);
    }
    else if (pulstate0 == LOW) {
        digitalWrite(ledresist,LOW);
    }
}
if (pumpmstate == HIGH){
    digitalWrite(ledpupm,HIGH);
    int intensd1=analogRead(pot);
    int intensd=map(intensd1,0,1024,0,255);
    analogWrite(pump,intensd);
}

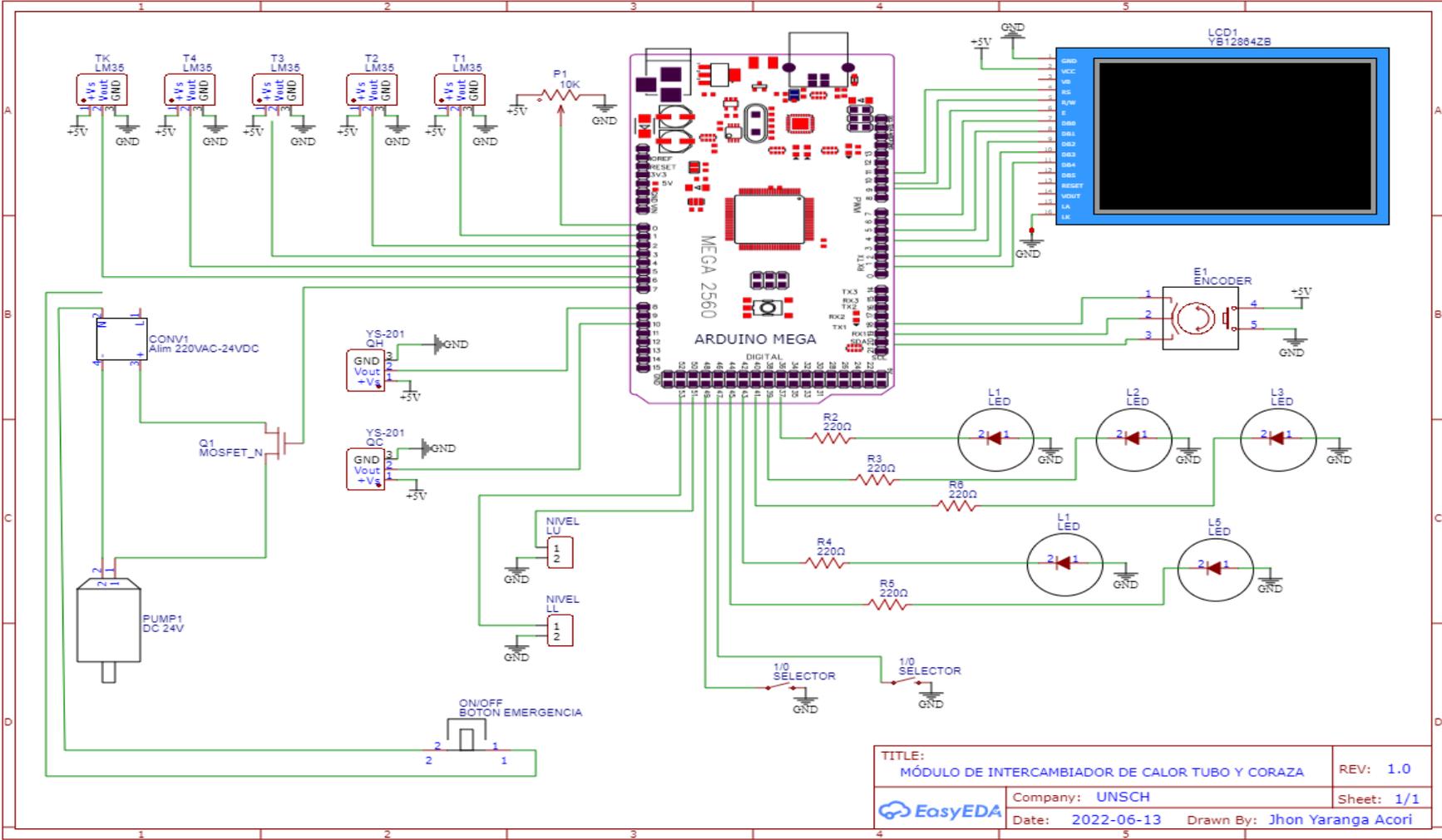
```

```

        Serial.println(intensd1);
    }
    if (pumpmstate == LOW){
        digitalWrite(ledpupm,LOW);
    }
}
void clearLCD(){
    u8g.firstPage();
    do {
        }while(u8g.nextPage());
}
void text8(void) {
    u8g.setFont(u8g_font_timB10);
    u8g.drawStr( 0, 12,"FAC.ING.QUIMICA");
    u8g.drawStr( 8, 26,"Y METALURGIA");
}
void text9(void) {
    u8g.setFont(u8g_font_timB10r);
    u8g.drawStr( 7, 44,"EP.ING.QUIMICA");
}
void text10(void) {
    u8g.setFont(u8g_font_timR08r);
    u8g.drawStr( 15, 59,"LAB.TRANSF.MASA");
}
void textlpm(void) {
    u8g.setFont(u8g_font_micro);
    u8g.drawStr( 46, 53,"LPM");
}
void textlpm1(void) {
    u8g.setFont(u8g_font_micro);
    u8g.drawStr( 112, 20,"LPM");
}
void flow () {
count++;
}
void flow1 () {
count1++;
}
}

```

Anexo 6 Diagrama del tablero de mando del intercambiador de calor



Anexo 7 *Panel fotográfico*

Figura A7 (a) *Equipo modular antes de la automatización*



Figura A7 (b) Dibujo 3D del intercambiador de calor

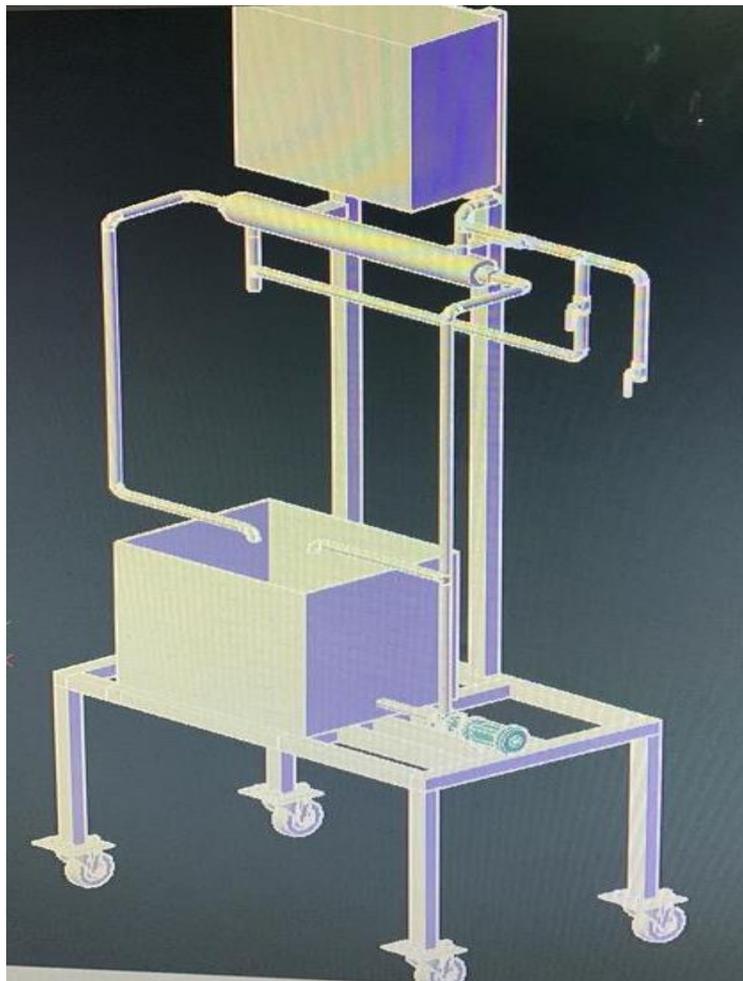


Figura A7 (c) Construcción de las tuberías y caja de control



Figura A7 (d) Instalación de tuberías del equipo



Figura A7 (e) Elaboración de la placa para el control y automatización

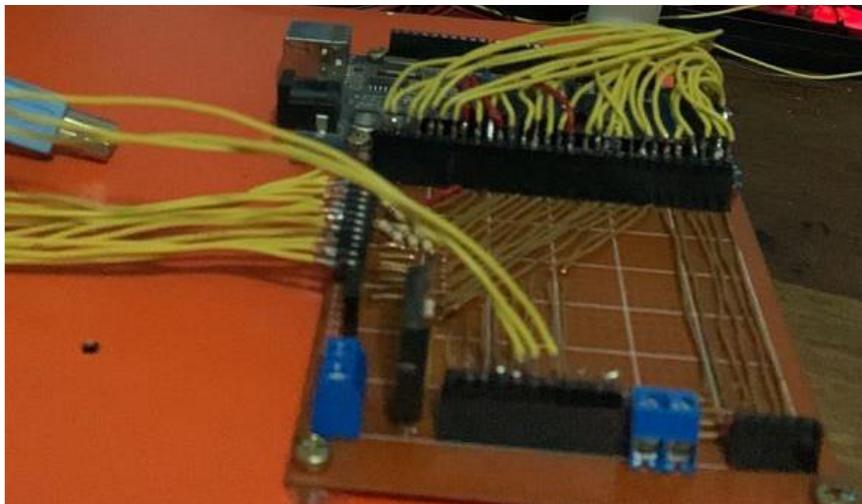
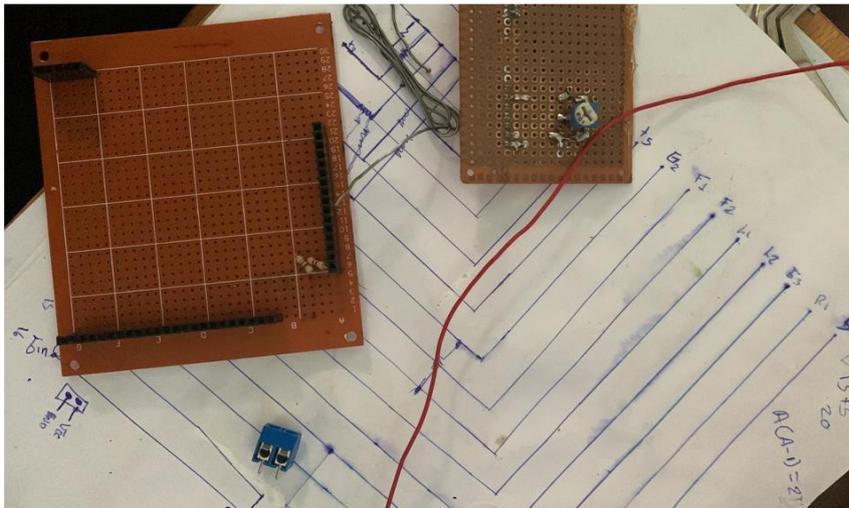


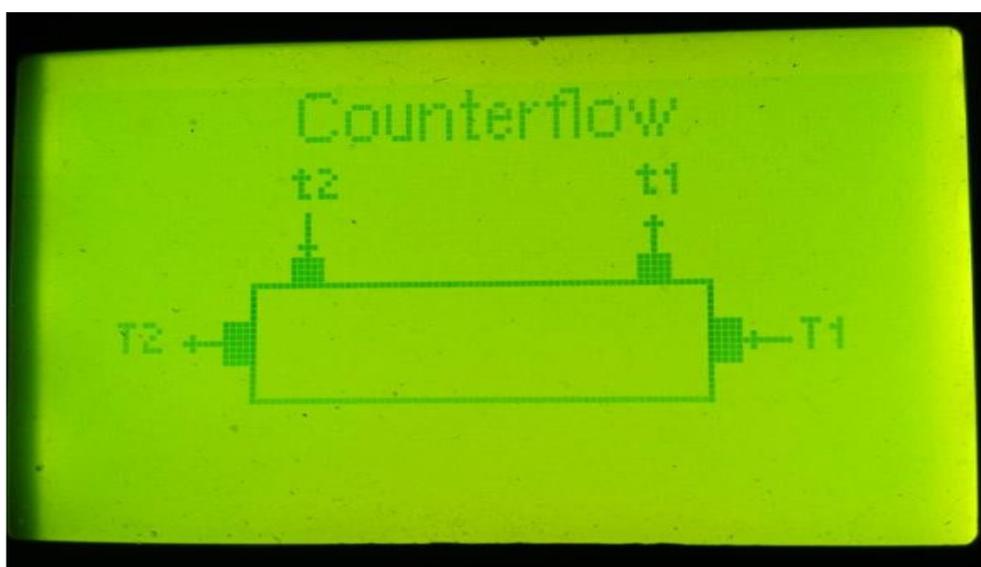
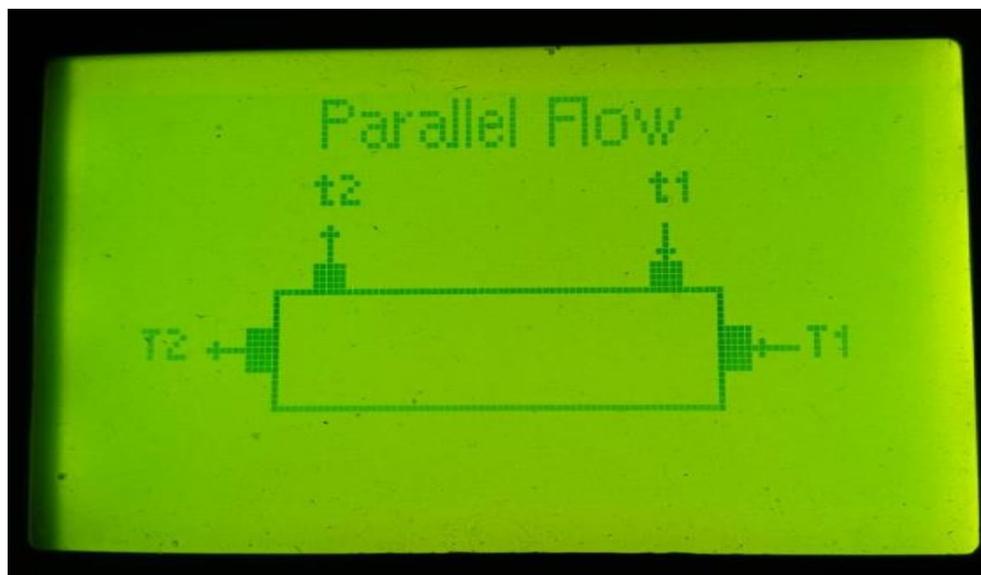
Figura A7 (f) Instalación de controladores y actuadores en el tablero de control



Figura A7 (g) Evaluación del control y automático



Figura A7 (h) Interfaz Hombre Máquina del intercambiador de calor



$t_1 = 26.9$	$^{\circ}\text{C}$	$Q_c = 11.15$	LPH
$t_2 = 26.9$	$^{\circ}\text{C}$	$Q_h = 10$	LPH
$T_1 = 26.6$	$^{\circ}\text{C}$		
$T_2 = 26.3$	$^{\circ}\text{C}$	$SP = 35^{\circ}\text{C}$	
$T_k = 26.9$	$^{\circ}\text{C}$		

UNIVERSIDAD NACIONAL
SAN CRISTOBAL DE
HUAMANGA
LAB. DE TRANSF. DE CALOR
Bernardo Enciso Lopez
Modulo IC tubo y conasa
Docente Ing. John Yaraanga Acari

Figura A7 (i) Válvulas del equipo de intercambiador de calor

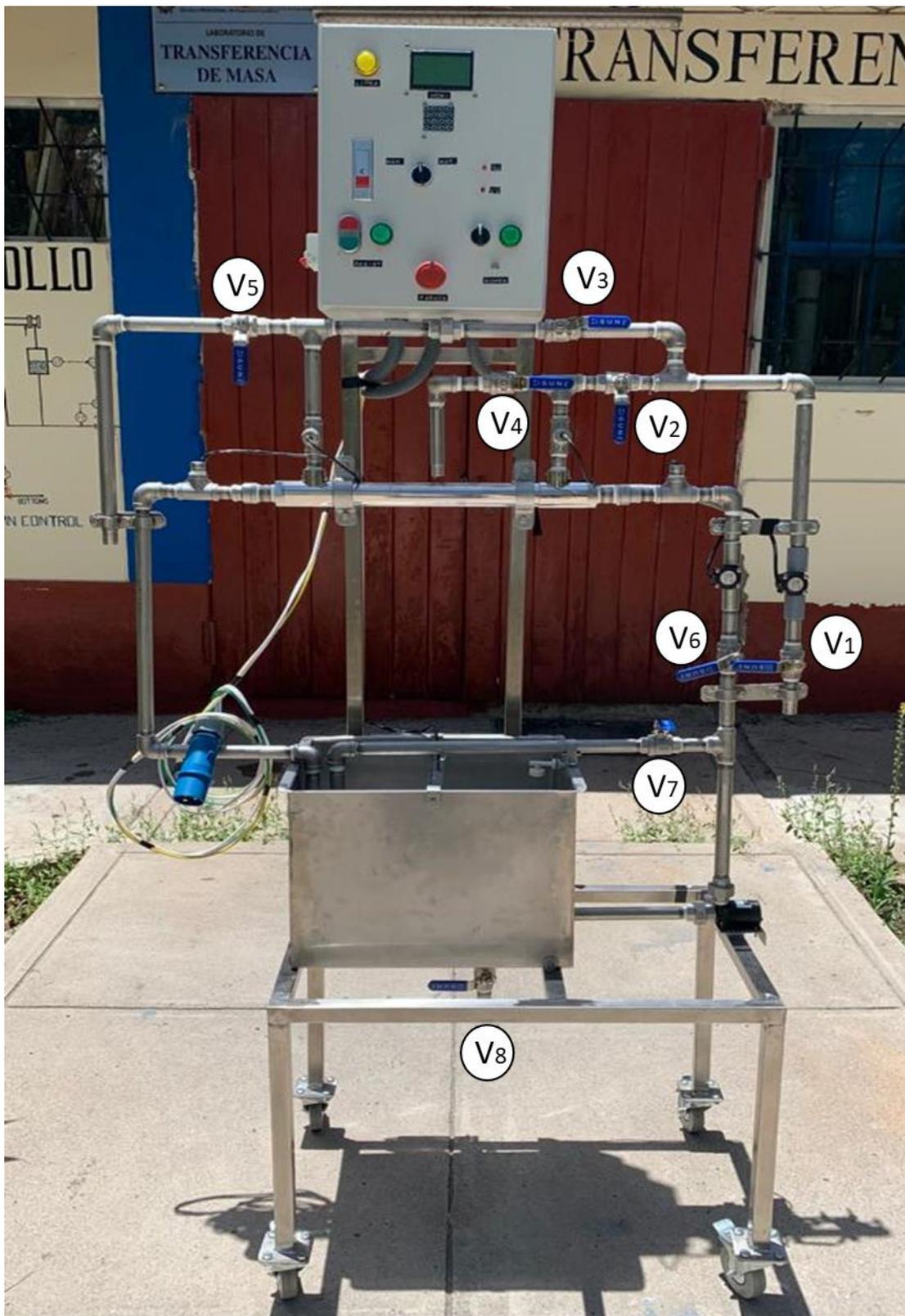


Figura A7 (j) Control automático del equipo de intercambiador de calor



Figura A7 (k) equipo automatizado



ACTA DE CONFORMIDAD

Los que suscribimos, miembros de Jurado Designado para el Acto Público de Sustentación de Tesis cuyo Título es: "AUTOMATIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBO Y CORAZA DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA FIQM-UNSCH CON TECNOLOGÍA ARDUINO". Presentado por el Bachiller en Ingeniería Química Jhon Mike YARANGA ACORI, el cual fue expuesto el día 17 de enero del 2023, en mérito a la RD N° 012-2023-UNSCH-FIQM/D, damos nuestra conformidad a la tesis mencionado y declaramos al recurrente apto para que pueda iniciar las gestiones administrativas conducentes al expedición y entrega de título profesional de Ingeniero Químico.

MIEMBROS DE JURADO	DNI	FIRMA
Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA	28223985	
Mg. Jack Edson HERNANDEZ MAVILA	41886792	
Mg. Abel Gilmer GUTIERREZ CUBA	28300362	

Ayacucho 24 de enero de 2023

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIAESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 002-2023-UNSCH-FIQM/EPIQ**

El que suscribe, Directora de la **Escuela Profesional de Ingeniería Química** de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte del Bach. **John Mike YARANGA ACORI**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

Tesis: Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM-UNSCH con tecnología Arduino

Autor : Bach. **Jhon Mike YARANGA ACORI**
Identificado : 2007638132
Fecha : 06 de febrero del 2023
Archivo : Tesis

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **13 (trece) % de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 06 de febrero del 2023



Adjunto **Reporte de Índice de Similitud**
cc. archivo

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERA
QUIMICA** Av. Independencia S/N –
Ayacucho Telf. 066-312510 Anexo. 152
Correo: ep.quimica@unsch.edu.pe



Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Jhon Mike Yaranga Acori
Assignment title: TESIS YARANGA
Submission title: Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza d...
File name: TESIS_YARANGA.pdf
File size: 4.41M
Page count: 54
Word count: 10,826
Character count: 55,845
Submission date: 06-Feb-2023 09:36AM (UTC-0500)
Submission ID: 2007638132

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza
del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM-UNSCH
con tecnología Arduino

PRESENTADO POR:

Bach. Jhon Mike YARANGA ACORI

Para optar el título profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

ASESOR:

M.CS. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH

AYACUCHO – PERÚ

2022

Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM-UNSCH con tecnología Arduino

por Jhon Mike Yaranga Acori

Fecha de entrega: 06-feb-2023 09:36a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2007638132

Nombre del archivo: TESIS_YARANGA.pdf (4.41M)

Total de palabras: 10826

Total de caracteres: 55845

Automatización del intercambiador de calor tubo y coraza del laboratorio de transferencia de calor de la FIQM-UNSCH con tecnología Arduino

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.camjol.info Fuente de Internet	2%
2	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	2%
3	vsip.info Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
6	vitela.javerianacali.edu.co Fuente de Internet	1%
7	repositorio.uac.edu.co Fuente de Internet	1%
8	docplayer.es Fuente de Internet	1%

9	es.slideshare.net Fuente de Internet	1 %
10	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1 %
11	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	dspace.unl.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	repositoriodspace.unipamplona.edu.co Fuente de Internet	<1 %
16	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
17	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
18	revistas.utp.edu.co Fuente de Internet	<1 %
19	caelum.ucv.ve Fuente de Internet	<1 %
20	virtual.urbe.edu Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía Activo