

	<b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b>		<b>CÓDIGO</b>	FO-GS-15
			<b>VERSIÓN</b>	02
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>			
			<b>FECHA</b>	03/04/2017
		<b>PÁGINA</b>	1 de 1	
<b>ELABORÓ</b>		<b>REVISÓ</b>	<b>APROBÓ</b>	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): CARLOS YESID APELLIDOS: TORRES PABON

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOSÉ RICARDO APELLIDOS: BERMÚDEZ SANTAELLA

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y MONITOREO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CORAZA.

En el presente trabajo se detalla el diseño, la simulación y la implementación parcial de un sistema de automatización, Control y monitoreo sobre un intercambiador de calor, en el contenido podrá encontrar minuciosamente cada uno de los diseños de los sistemas que se requieren para el desarrollo del mismo, como también las simulaciones y diagramas de conexiones necesarios para la implementación. Primeramente, encontrara un análisis detallado del intercambiador de calor, para lo cual se obtuvo el modelo matemático de la planta, seguidamente se encuentra el diseño de los sistemas de control, comunicación, monitoreo, interfaz humano-maquina (HMI) para la manipulación y la instrumentación requerida para llevar a cabo cada uno de los sistemas. Como tercera parte se presenta la fabricación de algunos elementos necesarios para llevar a cabo la implementación, como las termocuplas, las válvulas de control y módulos para conexiones, también se encuentra parte de los códigos de programación y la implementación de la interfaz HMI con las conexiones necesarias para el control del sistema. Finalmente se encuentran algunas pruebas de funcionamiento.

PALABRAS CLAVE: Modelo Matemático, Intercambiador de calor, Sistema de control.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 167 PLANOS: \_\_\_\_\_ ILUSTRACIONES: \_\_\_\_\_ CD ROOM: \_\_\_\_\_

\*\*Copia No Controlada\*

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y  
MONITOREO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR  
TIPO TUBO Y CORAZA.

CARLOS YESID TORRES PABÓN.

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y  
MONITOREO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR  
TIPO TUBO Y CORAZA.

CARLOS YESID TORRES PABÓN.

Trabajo de grado presentado como requisito final para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico.

Director: Ing. José Ricardo Bermúdez Santaella.

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA.

SAN JOSÉ DE CÚCUTA.

2020

**ACTA DE SUSTENTACIÓN PROYECTO DE GRADO**  
**MODALIDAD TRABAJO INVESTIGATIVO**

**FECHA:** 02 de febrero de 2021 **HORA:** 5 PM  
**LUGAR:** Sustentación Virtual  
**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:** "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y MONITOREO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CORAZA".

**JURADOS** Ing: GERMAN ENRIQUE GALLEGO RODRIGUEZ  
Mg: JOSE ARMANDO BECERRA VARGAS.

**DIRIGIDO:** Mg: JOSÉ RICARDO BERMÚDEZ SANTAELLA

**MERITORIA**

<b>NOMBRES DE LOS ESTUDIANTES:</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>CALIFICACION</b>
CARLOS YESID TORRES PABÓN	1091012	4.8

**FIRMA DE LOS JURADOS:**





VOBO. COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR



*Mayelina CA.*

## Contenido

	<b>pag</b>
Introducción	18
1. Problema	20
1.1 Título	20
1.2 Planteamiento del problema	20
1.3 Formulación del Problema	21
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo general.	21
1.4.2 Objetivos específicos.	22
1.5 Justificación	22
1.6 Alcances y Limitaciones	23
1.6.1 Alcances	23
1.6.2 Limitaciones	23
1.7 Delimitaciones	24
1.7.1 Delimitación espacial	24
1.7.2 Delimitación temporal	24
1.7.3 Delimitación Conceptual	24
2. Marco Referencial	25
2.1 Antecedentes	25

2.2 Marco Teórico	28
2.2.1 Procesos industriales	28
2.2.2 Intercambiadores de calor	28
2.2.3 Adquisición de datos	31
2.2.4 Control automático	33
2.2.5 Sistemas de control	33
2.2.6 Sensores y Transductores	33
2.2.7 Sensores de temperatura	34
2.2.8 Sensores de presión	36
2.2.9 Sensores de flujo.	36
2.2.10 Arduino	36
2.3 Marco Conceptual	38
2.4 Marco Contextual	39
2.5 Marco Legal	40
3. Diseño Metodológico	43
3.1 Tipo de Investigación	43
3.2 Población y muestra	43
3.3 Instrumentos Para la Recolección de Información	43
3.3.1 Fuentes primarias.	43
3.3.2 Fuentes secundarias	44

4. Metodología de Desarrollo	45
5. Desarrollo de la propuesta	46
5.1 Modelo matemático	46
5.1.1 Descripción de la planta	46
5.1.2 Desarrollo del modelo matemático	49
5.1.2.1 Contextualización	49
5.1.2.2 Desarrollo	60
5.1.2.3 Resultados	69
5.2 Diseño	72
5.2.1 Sistema de control	72
5.2.1.1 Control de temperatura	73
5.2.1.2 Control de flujo	81
5.2.2 Sistema de comunicación	81
5.2.3 Automatización	87
5.2.4 Sistema de monitoreo	91
5.2.5 HMI	92
5.2.6 Instrumentación	97
5.2.6.1 Controlador Arduino	98
5.2.6.2 Válvulas	102
5.2.6.3 Sensores de temperatura	105

5.2.6.4 Medidores de caudal	109
5.3 Implementación	122
5.3.1 Termocuplas	122
5.3.2 Módulos	128
5.3.3 Parte de control	133
5.3.4 Parte de potencia	138
5.3.5 Programación	140
5.3.6 Control de flujo:	144
5.4 Funcionamiento	151
5.4.1 Control	151
5.4.2 Termocuplas	152
5.4.3 Comunicación	153
6. Conclusiones	156
7. Recomendaciones	158
8. Referencias	160
9. ANEXOS	161

## Lista de figuras

	<b>pag</b>
Figura 1. Flujo paralelo	29
Figura 2. Contraflujo.	30
Figura 3. De tubos y coraza	31
Figura 4. Partes de un sistema de adquisición de datos.	31
Figura 5. Termocupla	35
Figura 6. Laboratorio plantas térmicas.	39
Figura 7. Intercambiador de calor.	40
Figura 8. Placa característica del intercambiador de calor.	40
Figura 9. Banco de pruebas intercambiador de calor.	46
Figura 10. Placa característica intercambiador de calor.	47
Figura 11. Balance de energía fluido frio	62
Figura 12. Balance de energía fluido caliente	62
Figura 13. Numero de Reynolds flujo de vapor	63
Figura 14. Numero de Reynolds flujo de agua	63
Figura 15. Coeficiente convectivo interno.	64
Figura 16. Coeficiente convectivo externo	64
Figura 17. Coeficiente total de transferencia de calor	65
Figura 18. Capacidad calorífica	65
Figura 19. Unidades de transferencia, transferencia de calor máxima	66
Figura 20. Efectividad flujo paralelo	66
Figura 21. Efectividad contraflujo	67

Figura 22. Efectividad flujo mixto	67
Figura 23. Tasa de transferencia de calor real.	67
Figura 24. Modelo matemático flujo paralelo	68
Figura 25. Modelo matemático contraflujo	68
Figura 26. Modelo matemático flujo mixto	68
Figura 27. Temperatura de salida agua variando los flujos de entrada para flujo paralelo	70
Figura 28. Temperatura de salida del agua variando los flujos de entrada para contraflujo	70
Figura 29. Temperatura de salida del agua variando los flujos de entrada para flujo mixto	70
Figura 30. Bias	74
Figura 31. Simulación para la relación de las variables de proceso	75
Figura 32. Relación entre las variables del sistema	75
Figura 33. Sistema de control malla cerrada	76
Figura 34. Respuesta sistema para controladores PID flujo paralelo	76
Figura 35. Sintonización contraflujo y flujo mixto.	77
Figura 36. Respuesta control proporcional	78
Figura 37. Respuesta control proporcional ante perturbaciones en el flujo de agua	78
Figura 38. Ajuste ganancia integrativa controlador PI	79
Figura 39. Zoom ajuste ganancia integrativa.	79
Figura 40. Respuesta final controlador PI	80
Figura 41. Respuesta final control PI ante perturbaciones	80

Figura 42. Sistema de control de flujo en malla cerrada	81
Figura 43. Diagrama de comunicación.	86
Figura 44. Modulo nrf24L01.	86
Figura 45. Diagrama de conexiones modulo NRF 24L01	87
Figura 46. Diagrama de automatización	88
Figura 47. Diagrama de instrumentación antes de realizar el proyecto.	89
Figura 48. Diagrama de monitoreo.	92
Figura 49. Conexión de entradas digitales tipo “pull-Down”	93
Figura 50. Teclado matricial 4x3	93
Figura 51. Conexión interna teclado.	94
Figura 52. Conexión teclado con Arduino.	94
Figura 53. Display 7 segmentos 4 dígitos.	95
Figura 54. Conexión display con Arduino.	95
Figura 55. Pantalla lcd 16x2.	96
Figura 56. Modulo i2c para pantalla lcd.	96
Figura 57. Diagrama de conexión pantalla 16x2 con Arduino i2c.	97
Figura 58. Diseño HMI.	97
Figura 59. Matriz binaria para elección del Arduino	100
Figura 60. Diagrama parte de control.	101
Figura 61. Diagrama parte de potencia.	101
Figura 62. Motor paso a paso.	102
Figura 63. Modulo DRV8825.	103
Figura 64. Diagrama de conexión para los pines del módulo DRV8825	104

Figura 65. Diagrama de conexión modulo DRV8825 con Arduino	104
Figura 66. Termocupla	107
Figura 67. Modulo max-6675.	108
Figura 68. Diagrama de conexión modulo Max 6675 con Arduino.	108
Figura 69. Estándar placa orificio	110
Figura 70. Separación para tomas de presión.	111
Figura 71. Plano placa orificio.	115
Figura 72. Vista 3D placa orificio.	115
Figura 73. Plano tomas de presión.	116
Figura 74. Diseño 3D tomas de presión.	116
Figura 75. Diseño completo placa orificio 3D.	117
Figura 76. Ubicación placa orificio.	117
Figura 77. Cálculos dimensiones de la placa	118
Figura 78. Cálculos tomas de presión	118
Figura 79. Sensor de presión diferencial.	119
Figura 80. Diagrama de conexión sensor de presión diferencial.	120
Figura 81. Diagrama de instrumentación banco de pruebas.	121
Figura 82. Funda termopozo	124
Figura 83. Unión de conductores termocupla	125
Figura 84. Unión racor-cubierta	126
Figura 85. Unión termocupla-termopozo	126
Figura 86. Llenado del termopozo con mortero refractario	127
Figura 87. Tapón termopozo	127

Figura 88. Instalación tapón termopozo	128
Figura 89. Termocuplas finalizadas	128
Figura 90. Circuito pcb termocuplas	129
Figura 91. Conexión modulo termocuplas	129
Figura 92. Módulo para conexión de termocupla	130
Figura 93. Circuito pcb módulo motores paso a paso	130
Figura 94. Diagrama conexiones modulo motores paso a paso	131
Figura 95. Módulo para motores paso a paso.	131
Figura 96. Circuito módulo displays	132
Figura 97. Conexión modulo displays	132
Figura 98. Modulo displays	133
Figura 99. Componentes HMI parte trasera	134
Figura 100. Componentes HMI parte delantera	134
Figura 101. Conexión parte de control	135
Figura 102. Diagrama de funcionamiento parte de control	136
Figura 103. Conexión parte de potencia	139
Figura 104. Diagrama de funcionamiento parte de potencia	139
Figura 105. Programación comunicación parte 1	140
Figura 106. Algoritmo intercambio de información	141
Figura 107. Programación comunicación parte 2	141
Figura 108. Programación para abrir o cerrar válvulas	142
Figura 109. Algoritmo para girar motor	142
Figura 110. Programación termocuplas	143

Figura 111. Programación displays	143
Figura 112. Válvula de compuerta	144
Figura 113. Acople motor paso a paso-cuerpo de la válvula	145
Figura 114. Diagrama del sistema de control de flujo	145
Figura 115. Instalación válvula y caudalímetro	146
Figura 116. Grafica de pasos vs flujo	147
Figura 117. Estimación del modelo válvula	148
Figura 118. Constantes modelo polinomial	148
Figura 119. Modelo válvula	149
Figura 120. Sistema de control de flujo	149
Figura 121. Sintonización control flujo	150
Figura 122. Respuesta sistema de control.	150
Figura 123. Respuesta sistema de control variando el valor del setpoint	151
Figura 124. Datos de temperatura termocuplas	153
Figura 125. Información recibida por radiofrecuencia en los controladores	154
Figura 126. HMI	155

## Lista de tablas

	<b>pag</b>
Tabla 1. Nomenclatura.	47
Tabla 2. Constantes	61
Tabla 3. Constantes controladoras	77
Tabla 4. Tabla comparativa módulos de comunicación inalámbrica	82
Tabla 5. Matriz de atributos	83
Tabla 6. Matriz de énfasis para A1	84
Tabla 7. Matriz de énfasis para A2	84
Tabla 8. Matriz de énfasis para A3	84
Tabla 9. Matriz de énfasis para A4	84
Tabla 10. Matriz de énfasis para A5	84
Tabla 11. Características placas Arduino	99
Tabla 12. Materiales para fabricar las termocuplas	123
Tabla 13. Tabla de verdad selección de flujo y control	137
Tabla 14. Datos de pasos vs flujo	146
Tabla 15. Datos de temperatura.	152
Tabla 16. Presupuesto	155

## **Lista de anexos**

**pag**

Anexo 1: Guías para utilizar el prototipo realizado

161

## **Resumen**

En el presente trabajo se detalla el diseño, la simulación y la implementación parcial de un sistema de automatización, Control y monitoreo sobre un intercambiador de calor, en el contenido podrá encontrar minuciosamente cada uno de los diseños de los sistemas que se requieren para el desarrollo del mismo, como también las simulaciones y diagramas de conexiones necesarios para la implementación. Primeramente, encontrara un análisis detallado del intercambiador de calor, para lo cual se obtuvo el modelo matemático de la planta, seguidamente se encuentra el diseño de los sistemas de control, comunicación, monitoreo, interfaz humano-maquina (HMI) para la manipulación y la instrumentación requerida para llevar a cabo cada uno de los sistemas. Como tercera parte se presenta la fabricación de algunos elementos necesarios para llevar a cabo la implementación, como las termocuplas, las válvulas de control y módulos para conexiones, también se encuentra parte de los códigos de programación y la implementación de la interfaz HMI con las conexiones necesarias para el control del sistema. Finalmente se encuentran algunas pruebas de funcionamiento.

## Introducción

Un proceso industrial comprende todo conjunto de operaciones o pasos diseñados para obtener, transformar o transportar materias primas, con el objetivo de conseguir una efectividad en una cadena de producción, aprovechando eficazmente los recursos naturales, para que se conviertan en herramientas que satisfagan las necesidades de sus consumidores y mejoren su calidad de vida; es por esto, que en cualquier empresa o industria son de vital importancia para su desarrollo. (Ing. Lopez Salazar, 2016)

En la antigüedad este tipo de procesos significaban para las empresas una serie de problemas en cuanto a producción y eficiencia, debido a que no arrojaban los índices más adecuados. Hoy en día gracias a los avances tecnológicos de las últimas décadas se ha encontrado una solución a estos problemas con técnicas que permiten la automatización de estos procesos y a su vez una continua supervisión y control de las variables de trabajo, permitiendo mejorar sus índices de competitividad por medio de elementos y dispositivos que brinden tener un mejor desempeño en cuanto a tiempos de producción, reducción de costos, aumento en la productividad y que generen seguridad a la hora de realizar estos procesos tanto para los trabajadores como para los consumidores, por ende hoy en día la gran mayoría de las industrias ya poseen plantas automatizadas para la producción de bienes y servicios que son ofertados a sus clientes contribuyendo en gran medida al desarrollo económico.

A lo largo del tiempo han surgido diferentes tecnologías que se encargan de cumplir todas estas tareas, dentro de las cuales la mayoría de ellas tiene un costo bastante elevado, además de que requiere de costosas licencias para poder hacer uso de ellas, en los últimos años ha ido tomando fuerza una nueva tecnología conocida como Arduino, la cual es una plataforma

de código abierto basada en software y hardware libre, lo que quiere decir que no requiere de ninguna licencia para su uso, por lo que puede ser usada por cualquier usuario con solo adquirir una de sus tarjetas, las cuales tienen un precio muy asequible y descargar el software disponible gratuitamente en la red, esta tecnología ha venido siendo utilizada con más fuerza en el entorno de la electrónica y la robótica.

Teniendo en cuenta la gran importancia tanto de los procesos industriales como de la automatización la Universidad Francisco de Paula Santander cuenta con grupos de investigación en estas áreas como lo son GIDPI y FLUTER los cuales tienen a su disposición un banco de pruebas de un intercambiador de calor tipo tubo y coraza para realizar sus respectivas investigaciones en el cual se pretenden implementar los sistemas anteriormente mencionados utilizando únicamente tecnología Arduino con el fin de mostrar las capacidades de esta tecnología para cumplir con este tipo de tareas.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y MONITOREO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CORAZA.

### **1.2 Planteamiento del problema**

Los grupos de investigación GIDPI y FLUTER de la Universidad Francisco de Paula Santander, cuentan con diferentes bancos de pruebas de procesos industriales, en los cuales está inmerso un intercambiador de calor, este es un dispositivo diseñado para lograr la transferencia de energía, como su nombre lo indica, en calor, entre dos medios que se encuentran separados por una barrera o están en contacto. Dispositivos como este, hacen parte de sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía, procesamiento químico y muchas otras aplicaciones.

Detalladamente el intercambiador de calor corresponde a uno de tubos y coraza, el cual está diseñado para trabajar de tres diferentes modos los cuales son: flujo mixto, flujo paralelo y contraflujo. El cambio de modo de trabajo se hace de manera completamente manual abriendo o cerrando una serie de válvulas que se encuentran en la salida y entrada del proceso. El proceso opera con dos tipos de flujo, los cuales son: agua (fluido frío), proveniente de una tubería en el laboratorio y vapor (fluido caliente), proveniente de una caldera que se encuentra conectada a la entrada del intercambiador, en dichos flujos están inmersas diferentes variables, de las cuales las más significativas son: presión, flujo y temperatura.

A menudo no se logra el correcto funcionamiento y la mayor eficiencia de este, como también se presentan demasiados tipos de fallas debido a la complejidad que resulta manejar este tipo de variables. Por lo general, estas fallas se deben a la falta de un sistema automatizado que permita el control y supervisión de las variables para poder hacer un análisis de su comportamiento.

Sumado a lo anterior, el laboratorio es relevante para los grupos de investigación, pero debido a la carencia de estos sistemas se hace compleja su correcta utilización tanto para fines investigativos como para prácticas de campo. Por lo que se hace necesario el diseño e implementación de un sistema automatizado, que permita el control y una continua supervisión de las variables del proceso, para ello se hará uso de la tecnología Arduino y así presentar una alternativa más económica al momento de llevar a cabo este tipo de tareas.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿Será posible desarrollar un sistema de automatización, control y monitoreo para un banco de pruebas de un intercambiador de calor tipo tubo y coraza, utilizando para ello únicamente tecnología Arduino?

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general.**

Desarrollar un sistema de control, automatización y monitoreo para el banco de pruebas del intercambiador de calor tipo tubo y coraza en el laboratorio de térmicas de la Universidad Francisco de Paula Santander, mediante tecnología Arduino.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

Desarrollar el modelo matemático del intercambiador de calor tipo tubo-coraza y simularlo en Simulink.

Diseñar el sistema de control, instrumentación, automatización, comunicación, HMI y monitoreo.

Implementar los sistemas de control, instrumentación, automatización, comunicación, HMI y monitoreo utilizando tecnología Arduino.

Realizar las pruebas necesarias para verificar el correcto funcionamiento del sistema en general.

### **1.4.3 Justificación**

Los procesos industriales han tenido una vital importancia en el desarrollo tecnológico y económico en la sociedad, Por ende, nace la necesidad de que estos sean cada vez más productivos, eficientes y que brinden la seguridad necesaria para no poner en riesgo los recursos humanos presentes en el campo donde se encuentran. Pero desarrollar estas mejoras muchas veces implica una inversión muy elevada debido a los altos costos en la instrumentación y las tecnologías que se requieren para ello.

Debido a la importancia de estos procesos, la Universidad Francisco de Paula Santander cuenta con un laboratorio de plantas térmicas el cual está asociado a grupos de investigación como GIDPI y FLUTER con el fin de ser usado como medio de estudio.

Dada la problemática correspondiente a la falta de uso y la complejidad que resulta realizar investigaciones en el mismo laboratorio por escasos de procesos de estudio, en este proyecto se plantea desarrollar un sistema de automatización, control y monitoreo en el banco de pruebas del intercambiador de calor tipo tubo y coraza haciendo uso de la tecnología Arduino, donde dicha mejora permitiría que el desempeño del mismo incrementara al dejar atrás su uso manual dando paso a un sistema donde brinde de manera práctica y sencilla, la adquisición de datos de las respectivas variables, realizando el control de estas, optimizando el proceso y aportando para que se puedan llevar a cabo investigaciones a futuro, además de presentar a la tecnología Arduino como una alternativa para realizar dichas tareas cuando no se cuente con los recursos necesarios para adquirir una tecnología más robusta.

#### **1.4.4 Alcances y Limitaciones**

##### **1.4.5 Alcances**

Los alcances de este proyecto son: obtener el modelo matemático del intercambiador, automatizar la apertura de las válvulas que permiten que el intercambiador de calor pueda variar entre sus 3 configuraciones de flujo, diseñar e implementar un sistema de control de las variables del proceso e implementar un sistema de monitoreo que permita una constante visualización de las variables del proceso, todo lo anterior haciendo uso de la tecnología Arduino.

##### **1.4.6 Limitaciones**

La principal limitación que se puede encontrar a la hora de realizar el proyecto es la disponibilidad del laboratorio para realizar las pruebas, mediciones e instalaciones necesarias y la falta de recursos económicos para la obtención de la instrumentación más adecuada para llevar a cabo la implementación.

### **1.4.7 Delimitaciones**

#### **1.4.8 Delimitación espacial**

Este proyecto se llevará a cabo en el laboratorio de plantas térmicas de la universidad Francisco de Paula Santander sede central Cúcuta.

#### **1.4.9 Delimitación temporal**

El proyecto tendrá una duración de 8 meses a partir de la aprobación por parte del comité curricular de ingeniería electromecánica.

#### **1.4.10 Delimitación Conceptual**

Procesos industriales

Intercambiador de calor

Modelo matemático

Sistema de Monitoreo

Automatización

Sistema de control

Adquisición de datos

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Antecedentes

López meguez ramón Alcides, pacheco Araujo Sergio Mario, Ruiz castillo Jesús David. El proyecto tiene como título: Diseño detallado de un sistema de control automático para un banco de pruebas (planta piloto) de un intercambiador de calor tipo tubo-coraza para laboratorio de robótica de la IECASD. Cartagena 2013. Proyecto presentado para obtener el título de especialistas en automatización y control en procesos industriales.

Universidad tecnológica de Bolívar, facultad de postgrados.

En este proyecto se implementó un sistema de control de temperatura para un intercambiador de calor tipo tubo-coraza para mantener la temperatura en el valor (70°C- 45°C). Además, el sistema cuenta con un supervisor que permite monitorear la temperatura de entrada, temperatura de salida y la rata de entrada de flujo del fluido del proceso. Con el desarrollo del proyecto beneficiaron a más de 2700 estudiantes que conforman el nodo petroquímico, ya que la institución no contaba con una planta piloto de esa índole. Este proyecto se toma como antecedente ya que cuenta con sistema que permite visualizar las variables del proceso que podría servir como guía al momento de realizar el sistema de monitoreo.

Saldaña Zamora Edgar, Santos Espinoza Mario, Zúñiga Cortes Hugo. Este proyecto tiene como título: Diseño y construcción del sistema de control para un intercambiador de calor tubular. México 2013. Proyecto presentado para obtener el título de ingeniero en control y automatización.

Instituto politécnico nacional, escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, unidad profesional Adolfo López Mateos, departamento de ingeniería en control y automatización.

Este proyecto presenta una propuesta de dos tipos de control para un prototipo de laboratorio de transferencia de calor. El desarrollo del sistema de control se basa en el monitoreo de dos variables de entrada (flujo y presión) y una variable de salida (temperatura). En el entorno de programación grafica LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos cuyas características permiten la recolección de datos de las variables y presenta su salida en formato digital a 16 bits para su posterior conversión a una señal análoga tipo industrial. Se desarrolla una estrategia de control en cascada y alternativamente un controlador difuso. El sistema SCADA recopila los datos y los muestra en una interfaz de usuario además presenta un reporte de datos históricos y análisis de la información. Se toma como antecedente ya que desarrollan un sistema de control, automatización y supervisión de las variables del proceso lo cual es muy similar a lo que se quiere lograr en este proceso y podría ser de mucho apoyo.

Antepara Zambrano Oscar Luis, Burgos Rivera José Wilson. Este proyecto tiene como título: Implementación de un sistema de monitoreo para un intercambiador en tiempo real por internet: diseño y construcción del equipo experimental. Guayaquil (ecuador) 2010. Proyecto presentado para obtener el título de ingeniero mecánico.

Escuela superior politécnica del litoral, facultad de ingeniería en mecánica y ciencias de la producción.

En este proyecto se presenta el diseño y construcción de un equipo experimental que permite el monitoreo remoto, a través de internet, de las variables termodinámicas de un intercambiador de calor de flujo cruzado aire/agua. Se miden temperaturas para los dos fluidos

con termocuplas y se transmiten a través de internet a cada cliente remoto enlazado con el laboratorio digital. Se utiliza el lenguaje de programación LabVIEW a través del puerto USB para la comunicación entre el ordenador y el equipo experimental. Se toma como antecedente ya que cuenta con un sistema de supervisión con conexión a internet el cual podría servir como guía.

Salas Camacho Franklin Andrés. Este proyecto tiene como título: Sistema de control en un intercambiador de calor de doble tubo. Cuzco (Perú) 2017. Proyecto presentado para obtener el título de ingeniero químico.

Universidad Nacional de San Antonio Abad del cusco. Facultad de ingeniería de procesos, escuela profesional de ingeniería química.

En este proyecto se implementó un sistema de control de un intercambiador de calor de doble tubo, donde se identificó la dinámica del proceso por medio del método de la caja negra. Donde por medio de las señales de entrada y salida del proceso se obtuvo la función de transferencia y haciendo uso del software MATLAB, con tarjetas Arduino para la adquisición de las señales de los sensores de flujo y temperatura, e implementando estrategias de control P, PI y PID, se realizó la sintonía de los controladores por el método de la ganancia última de Ziegler – Nichols, por último se empleó el entorno de LabVIEW para el diseño del sistema SCADA, integrando la adquisición de datos, el control y la supervisión de las variables, ofreciendo una mejor comprensión sobre el comportamiento del fenómeno de transferencia de calor así como las variables implicadas en el proceso. Se tomó como referencia ya que hacen uso de herramientas como Matlab, LabVIEW y Arduino en la implementación del sistema de control. Las cuáles serán usadas para el desarrollo del presente proyecto.

## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1 Procesos industriales**

Un proceso industrial es todo aquello que comprende una serie de pasos ordenados u organizados que se llevan a cabo de forma alternativa o simultánea, los cuales están relacionados entre sí y tiene como propósito llegar a un resultado específico. Desde un punto de vista general se entiende que la finalidad de un proceso implica una transformación o una evolución del elemento sobre el cual se está trabajando hasta que este llegue a su conclusión. (Ing. Lopez Salazar, 2016)

De esta manera, un proceso industrial encierra un conjunto de pasos diseñados con el fin de obtener, transformar o transportar uno o más elementos primarios. De forma que se aprovechen eficazmente los recursos naturales y que se conviertan en materiales, herramientas o sustancias que puedan satisfacer fácilmente las necesidades de las personas y que además ayuden a mejorar su calidad de vida. (Ing. Lopez Salazar, 2016)

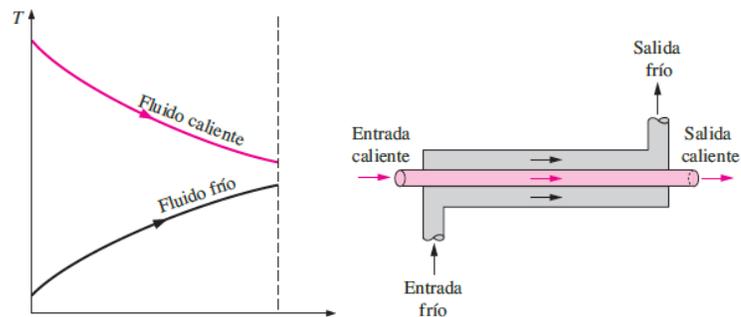
### **2.2.2 Intercambiadores de calor**

Son aparatos que permiten el intercambio de calor entre dos fluidos que están separados entre sí y que están a temperaturas diferentes. En la práctica tienen múltiples usos desde sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento de aire como también en procesos químicos y producción de energía en grandes plantas (Cengel & Ghajar, 2011).

#### Tipos de intercambiadores de calor

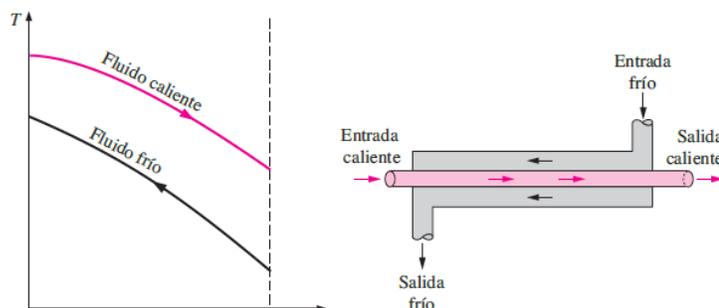
Dado a las diferentes aplicaciones que tiene la transferencia de calor se requieren distintos tipos de componentes y configuraciones para realizarla.

El tipo más simple de intercambiador de calor es el de dos tubos concéntricos de diámetro diferente llamado de doble tubo o tubos concéntricos. Donde uno de los fluidos pasa por el tubo de menor diámetro y el otro lo hace por el espacio entre los dos tubos. En estos tipos de intercambiador de calor se pueden dar dos configuraciones diferentes dependiendo de las direcciones de los flujos. En el flujo paralelo como se puede ver en la figura 1, los dos flujos (frio y caliente) entran al intercambiador por un mismo extremo y se mueven en la misma dirección. Por otra parte, en el de contraflujo o contracorriente los fluidos entran en el intercambiador por extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas como se puede ver en la figura 2. (Cengel & Ghajar, 2011).



**Figura 1. Flujo paralelo**

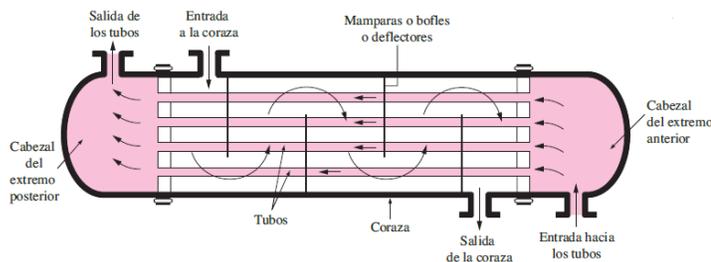
Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)



**Figura 2. Contraflujo.**

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Otra configuración de intercambiadores de calor y quizás el más común en aplicaciones industriales es el de tubos y coraza mostrado en la figura 3. Esta clase de intercambiadores cuentan con un número de tubos dentro de una carcasa con su eje paralelo a ellos. La transferencia de calor tiene lugar mientras que uno de los fluidos se mueve dentro de los tubos y otro por fuera de estos, pasando por la coraza. Con el fin de mejorar la transferencia de calor es muy común encontrar desviadores dentro de la carcasa para formar turbulencias en el fluido que circula por la coraza y también para mantener un espaciado uniforme entre los tubos. A pesar de su extendido uso no son adecuados para utilizarse en espacios pequeños debido a su peso y tamaño relativamente grandes. En los extremos de la coraza podemos observar zonas grandes llamadas cabeceras en donde desembocan los tubos y se acumula el fluido antes de entrar y después de salir de los tubos (Cengel & Ghajar, 2011).



**Figura 3. De tubos y coraza**

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 2.2.3 Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) consiste en el proceso en el cual se mide con una PC cualquier fenómeno eléctrico o físico ya sea voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consta de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparándolo con los sistemas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesador, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs para proporcionar una solución de medidas más eficiente, flexible y rentable (Corporation, National Instruments, 2019).

A continuación, en la figura 4 se pueden observar las partes de un sistema de DAQ.



**Figura 4. Partes de un sistema de adquisición de datos.**

Fuente: recuperado de <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

¿Qué es un Sensor?

Es un dispositivo que convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que puede ser medida. Esta medida puede ser por ejemplo la temperatura de una habitación, la intensidad de una fuente de luz o la fuerza que se le aplica a un objeto. Existen muchos tipos de sensor los cuales pueden entregar una señal de salida de voltaje, corriente, resistencia o algún otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos de estos sensores requieren de componentes adicionales o circuitos para producir correctamente la señal que pueda ser medida con precisión y con confiabilidad en el dispositivo DAQ. (Corporation, National Instruments, 2019)

¿Qué es un Dispositivo DAQ?

El hardware DAQ funciona como la conexión entre una pc y señales exteriores. Su principal función es digitalizar señales analógicas de entrada para que puedan ser interpretadas por un pc. Los componentes principales de este dispositivo son el circuito de acondicionamiento, el convertidor análogo-digital y un bus de pc (Corporation, National Instruments, 2019).

¿Cuál es la Función de la PC en un Sistema DAQ?

Una PC con acceso a un software de programación se usa para controlar la operación del dispositivo DAQ y procesa, visualiza y almacena los datos de medida. Dependiendo de la aplicación se pueden utilizar diferentes tipos de PCs. Una PC de escritorio se puede utilizar en un laboratorio debido a su velocidad de procesamiento, una laptop se puede utilizar en sistemas móviles por su portabilidad y una PC industrial se puede usar en una planta de producción gracias a su robustez. (Corporation, National Instruments, 2019).

#### **2.2.4 Control automático**

Es la rama de la ingeniería que se encarga de que los sistemas funcionen de manera autónoma, permitiendo llevar a cabo tareas que un humano no es capaz de realizar. Sin esta rama de la ingeniería no sería posible disfrutar de las facilidades cotidianas ni sería posible el actual nivel de industrialización. Controlar consiste en tomar como referencia una serie de decisiones y actuar en consecuencia a ellas para conseguir un objetivo. Cuando en estas decisiones intervienen los humanos se le denomina control manual, pero si estas las toma el mismo sistema de forma autónoma se le califica como control automático. (Comite español de automatica, 2009).

#### **2.2.5 Sistemas de control**

Se define como el conjunto de elementos que funcionan de manera conjunta para proporcionar un objetivo o resultado deseado. Los componentes básicos son: objetivos de control, componentes del sistema de control, resultado o salida. Algunos ejemplos de sistemas de control pueden ser: sistemas de control de velocidad, de temperatura, de nivel (Carrillo Paz, 2011).

#### **2.2.6 Sensores y Transductores**

Un transductor se define como aquel dispositivo capaz de convertir una variable física en otra que tiene un dominio diferente. Un transductor forma parte de un sensor, pero la diferencia entre el sensor y el transductor es que el transductor simplemente cambia el dominio de la variable, mientras que el sensor proporciona una salida útil que puede ser usada como variable de entrada a un sistema. De manera general puede decirse que el transductor cambia una variable física por una señal eléctrica. Los transductores pueden clasificarse en dos ramas: transductores

de entrada y transductores de salida. Cuando el transductor se usa como parte de un sistema de censado se dice que es un transductor de entrada es decir un transductor de entrada es aquel que se usa para medir variables físicas y su salida se utiliza como parte de un sistema de procesamiento de información. Por otro lado, cuando el transductor es usado como de un sistema de actuación se dice que es un transductor de salida. (Corona, Abarca, & Mares, 2014)

Puede decirse que la definición de sensor está relacionada con la definición de transductor ya que un sensor siempre hará uso de un transductor. De este modo el concepto de sensor se define como “un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida”. A diferencia del transductor el sensor solo puede ser un dispositivo de entrada ya que siempre será un intermediario entre la variable física y el sistema de medida. Hoy en día los sensores entregan señales eléctricas ya sea analógicas o digitales y pueden clasificarse de muchas formas distintas pero la más común es por el tipo de variable a medir. (Corona, Abarca, & Mares, 2014)

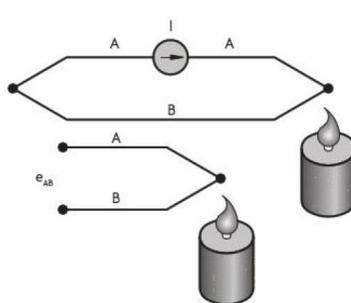
### **2.2.7 Sensores de temperatura**

Se define la temperatura como la intensidad de calor de un cuerpo, existen diferentes maneras de medir esta magnitud física las cuales pueden variar dependiendo del tipo de elemento u objeto a medir y la precisión requerida. Esta información se suministra en unidades de grados en escalas estándar como: Fahrenheit, Celsius, Kelvin, Rankine. Entonces un sensor de temperatura se define como aquel instrumento capaz de medir esta variable (Corona, Abarca, & Mares, 2014).

Los más comunes se les conoce como sensores termoelectricos y se pueden clasificar en:

Termistor: un termistor es una resistencia construida a base de material semiconductor que es sensitivo a los diferentes niveles de temperatura y varia su valor resistivo de acuerdo a los cambios en la energía térmica.

Termopar o termocupla: es el dispositivo más usado para medir temperatura en la actualidad. Consiste en un par de conductores A y B como se muestra en la figura 5 los cuales tienen diferentes propiedades. En general estos dos conductores se encuentran unidos entre si formando un circuito. Donde dichas uniones están sometidas a diferentes temperaturas haciendo que se genere una corriente eléctrica atreves del circuito. (Corona, Abarca, & Mares, 2014)



**Figura 5. Termocupla**

Fuente: (Corona, Abarca, & Mares, 2014)

Sensor de temperatura resistivo (RTD): Al igual que el termistor con coeficiente de temperatura positivo opera de acuerdo con el principio del cambio en la resistencia térmica de los metales. Es decir, en la medida en que aumenta la temperatura hay un aumento en la resistencia eléctrica. Gracias a su alta estabilidad y su relación positiva y lineal entre la temperatura y la resistencia térmica es uno de los dispositivos más utilizados para medir temperatura (Corona, Abarca, & Mares, 2014).

### **2.2.8 Sensores de presión**

La cantidad de presión en un fluido ya sea líquido o gas se define como la fuerza por unidad de área. Un sensor de presión es un transductor, en general de voltaje, entre la fuerza aplicada en un área determinada y una señal eléctrica. Por lo que es importante especificar que un sensor de presión es una aplicación específica de sensores de fuerza. La diferencia es que los sensores de presión cuentan con un diafragma la cual es el área efectiva en la que se mide la fuerza aplicada. De esta manera es posible determinar la fuerza por unidad de área (Corona, Abarca, & Mares, 2014).

### **2.2.9 Sensores de flujo.**

La medición del flujo tiene una gran importancia en el campo de los procesos industriales, ya que sirve como base para controlar el desarrollo del proceso de manera adecuada. La detección del flujo de un fluido se puede determinar de tres formas distintas. Una es la medición vectorial de la dirección del flujo y su velocidad, otra es la detección del flujo volumétrico y por último la medición del flujo másico (Corona, Abarca, & Mares, 2014).

### **2.2.10 Arduino**

Arduino forma parte del concepto de hardware y software libre y está abierto para uso y contribución de toda la sociedad. Es una plataforma de prototipos electrónicos creada en Italia, que consiste en una placa microcontroladora con un lenguaje de programación que permite la entrada y salida de datos y señales. Fue creada en 2005 con el objetivo de servir como base para proyectos de bajo costo y es lo suficientemente simple para ser usado por los desarrolladores. Arduino es una plataforma de computación física (sistemas digitales conectados a sensores y actuadores que permiten construir sistemas que perciben la realidad y responden con acciones

físicas) basada en una placa microcontroladora at mega que utiliza el lenguaje de programación C++. Es un kit de desarrollo capaz de interpretar variables en el entorno y transformarlas en las señales eléctricas conectadas a sus entradas y proporcionar un control o accionamiento de algún otro elemento conectado a los terminales de salida. Es como un ordenador con sensores de entrada que hace interfaz con circuitos eléctricos pudiendo recibir o enviar datos/tensiones en estos. (Garrido Pedraza).

**Hardware:** Consiste en un microcontrolador de 8 bits, el cual cuenta con componentes que facilitan la programación e incorporación con otros circuitos. Un aspecto importante es la manera en cómo están expuestos los conectores permitiendo a la CPU conectarse a otros módulos expansivos conocidos como SHIELDS. Utilizan la serie de chips mega, la gran mayoría incluye un regulador lineal de 5V y un oscilador de cristal de 16 MHz. Conceptualmente cuando se utiliza el software, monta todas las placas sobre una programación de conexión serial RS-232 pero puede variar dependiendo de la versión. (Garrido Pedraza).

**Software:** El ARDUINO IDE es una aplicación multiplataforma escrita en java. Esta esquematizada para introducir a la programación a principiantes y personas que no están familiarizadas con el desarrollo de software, viene con una biblioteca llamada “wiring” la cual tiene la capacidad de programas en C++. Esto permite crear con facilidad múltiples operaciones de entrada y salida, teniendo solamente que definir dos funciones en la aplicación para hacer un programa funcional.

Setup (): se inserta en el inicio en el cual puede ser usada para inicialización.

Loop (). Llamada para repetir el bloque de comandos o esperar hasta que sea desconectada. (Garrido Pedraza).

## 2.3 Marco Conceptual

**Automatización:** Es cuando se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

**Banco de pruebas:** Es una plataforma para experimentación de proyectos de gran desarrollo.

**Eficiencia:** capacidad de realizar o cumplir adecuadamente una función.

**Equipo de medición:** Instrumento de medición, software, patrones de medida, material de referencia o cualquier aparato auxiliar o una combinación de estos, necesarios para llevar a cabo los procesos de medición.

**Flujo:** cantidad de sustancia que pasa por una sección determinada durante un periodo de tiempo dado.

**Instrumentación:** conjunto de elementos necesarios para llevar a cabo una actividad, llevar a cabo un plan o llegar a una solución.

**Medición:** Conjunto de operaciones para determinar el valor de una magnitud.

**Monitoreo:** Es un seguimiento constante que se le hace a una variable con el fin de analizar su comportamiento.

**Sistema de control:** Es el conjunto de componentes que regulan el comportamiento de una variable.

**Variable:** Es aquello que varía o que está continuamente sujeto a algún cambio.

**VARIABLES DEL PROCESO:** Son aquellas que pueden cambiar las condiciones de un proceso, ya sean sus aspectos físicos o químicos, que a su vez puedan afectar el producto.

## 2.4 Marco Contextual

Este proyecto titulado sistema de control, automatización y monitoreo para un banco de pruebas de un intercambiador de calor tipo tubo y coraza, se realizará en el laboratorio de plantas térmicas de la universidad francisco de paula Santander el cual se muestra en la figura 6. De igual manera en la figura 7 se muestra el banco de pruebas al cual hace referencia el título y en la figura 8 su respectiva placa característica.



**Figura 6. Laboratorio plantas térmicas.**



**Figura 7. Intercambiador de calor.**



**Figura 8. Placa característica del intercambiador de calor.**

## 2.5 Marco Legal

La normativa para la implementación de sistemas de control se centra principalmente en aspectos propios del funcionamiento de la instrumentación y en la especificación de protocolos de información. A continuación, se presenta las características de las más importantes:

ANSI/ISA S5.1 “Simbología y diagramas de instrumentación”. Diseño de diagramas de instrumentación.

ANSI/ISA-101.01-2015: “Interfaces Humano-Maquina para sistemas de automatización de procesos”

ISA-5167-2: 2003 “Measurement of fluid Flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Orifice plates”. Medición de caudal mediante placas orificio.

ANSI/ISA-99.01.01-2007 “Security for Industrial Automation and Control Systems: Concepts, Terminology and Models”. Primer documento de la serie. Se encarga de sentar las bases a usar en el resto de la serie.

ANSI/ISA-99.02.01-2009 “Establishing an Industrial Automation and Control Systems Security Program”. Fue el último que se publicó de la serie ISA99. Describe los elementos necesarios para implantar un sistema de gestión de la ciberseguridad y proporciona una guía para conocer los requerimientos de cada uno de los elementos que lo componen.

IEC/TS 62443-1-1:2009: es una especificación técnica que define la terminología que define los conceptos y modelos para los sistemas de control y automatización industrial. Es la actualización de la norma ANSI/ISA-99.01.01-2017 de la ISA99.

IEC/62443-2-1:2010: este documento es la actualización del documento ANSI/ISA-99-02-01-2019 publicado por la ISA 99 que describe el sistema de gestión de la ciberseguridad para sistemas de control.

NIST SP 800-82: en este documento podemos encontrar una guía sobre cómo proteger los sistemas de control industrial (ICS), dentro de los cuales están incluidos los sistemas SCADA y otras configuraciones como los PLCs. Este documento presenta una descripción general de ICS

y sus topologías típicas, describe las amenazas y vulnerabilidades típicas y proporciona medidas de seguridad para minimizar estos riesgos.

### **3. Diseño Metodológico**

#### **3.1 Tipo de Investigación**

El objetivo de este proyecto es automatizar un intercambiador de calor, haciendo control en una de sus variables y proporcionar un sistema de monitoreo el cual pueda servir como base de datos para investigaciones futuras sobre su comportamiento y funcionamiento, además se empleará tecnología Arduino para su implementación con el fin de evaluar sus capacidades en este tipo de tareas. Teniendo en cuenta lo anterior el tipo de investigación será descriptiva, experimental e investigativa: descriptiva porque lo que se pretende es medir y recoger información de manera independiente sobre las variables de trabajo; experimental ya que se realizaran trabajos de campo y de laboratorio para controlar las variables relacionadas con el caso de estudio, investigativa ya que se realizara con tecnología Arduino con la finalidad de evaluar sus capacidades.

#### **3.2 Población y muestra**

En el desarrollo del proyecto se llevará a cabo en un laboratorio lo cual solo involucra a el investigador y su director y no se tendrán en cuenta grupos de personas para realizar encuestas o recolectar información. Por este motivo la población es nula.

#### **3.3 Instrumentos Para la Recolección de Información**

##### **3.3.1 Fuentes primarias.**

Normas técnicas y reglamentos que rigen el diseño e implementación de cada uno de los sistemas que comprende el desarrollo del proyecto.

### **3.3.2 Fuentes secundarias**

Recolección de información en bases de datos de biblioteca de la universidad, internet, artículos y proyectos de grados similares al tema de estudio.

#### 4. Metodología de Desarrollo

**Desarrollar el modelo matemático del intercambiador de calor tipo tubo y coraza y simularlo en Simulink.** Tomando bases de datos de biblioteca, internet, artículos especializados, libros de termodinámica y transferencia de calor de donde se procede estudiar las características del intercambiador y las ecuaciones que lo modelan para posteriormente implementarlo en la herramienta Simulink para obtener las relaciones dinámicas y estáticas del sistema.

**Diseñar el sistema de control, instrumentación, comunicación, interfaz gráfica y automatización del intercambiador de calor.** Teniendo en cuenta libros de control e instrumentación, artículos y proyectos relacionados con el tema, como también el apoyo de profesores con experiencia en las áreas de estudio para llevar a cabo los respectivos diseños y diagramas de conexiones.

**Implementar los sistemas de control, instrumentación, comunicación, interfaz gráfica y automatización del intercambiador utilizando tecnología Arduino.** Se recopila información en libros de comunicaciones industriales, artículos de investigación, proyectos relacionados con el tema y conocimientos propios para implementar de la manera más adecuada los sistemas propuestos y cumplir con los requerimientos y necesidades para el óptimo desarrollo del proyecto.

**Realizar las pruebas necesarias para verificar el correcto funcionamiento del sistema en general.** Se realizan las pruebas y ajustes necesarios para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y evaluar su rendimiento.

## 5. Desarrollo de la propuesta

### 5.1 Modelo matemático

#### 5.1.1 Descripción de la planta



**Figura 9. Banco de pruebas intercambiador de calor.**

En la figura 9 se observa el banco de pruebas del intercambiador de calor sobre el cual se trabajó, el cual corresponde a un intercambiador de calor tipo tobo-coraza que cuenta con 3 diferentes modos de trabajo como se puede ver en la figura 10.



**Figura 10. Placa característica intercambiador de calor.**

El cambio de configuración de flujo se realiza abriendo o cerrando las válvulas que nos indique la descripción de la placa característica.

Los fluidos de trabajo del intercambiador de calor son, vapor como fluido caliente el cual circula por el lado de los tubos proveniente de una caldera que se encuentra dentro del mismo laboratorio y agua a temperatura ambiente como fluido frío circulando por el lado de la coraza.

En la tabla 1 se presentará la nomenclatura que se utilizó en el desarrollo del trabajo.

**Tabla 1. Nomenclatura.**

Símbolo	Descripción	Unidades
$cp_f$	Calor específico agua	$J / (Kg \cdot K)$
$cp_c$	Calor específico vapor	$J / (Kg \cdot K)$
$\dot{m}_c$	Flujo masico vapor	$Kg / s$
$\dot{m}_f$	Flujo masico agua	$Kg / s$
$T_{fe}$	Temperatura de entrada del agua	$^{\circ}k$

$T_{fs}$	Temperatura de salida del agua	$^{\circ}k$
$T_{ce}$	Temperatura de entrada del vapor	$^{\circ}k$
$T_{cs}$	Temperatura de salida del vapor	$^{\circ}k$
$\dot{Q}$	Calor transferido	$J/s$
DHc	Diámetro hidráulico coraza	m
DHt	Diámetro hidráulico tubos	m
Di	Diámetro interno de los tubos	m
Do	Diámetro externo de los tubos	m
Kc	Conductividad vapor	$W/(m^{\circ}k)$
Kf	Conductividad agua	$W/(m^{\circ}k)$
Km	Conductividad material	$W/(m^{\circ}k)$
hi	Coefficiente de convección interno	$J/s \cdot m^2 \cdot K$
ho	Coefficiente de convección externo	$J/s \cdot m^2 \cdot K$
$\rho_c$	Densidad vapor	$Kg/m^3$
$\rho_f$	Densidad agua	$Kg/m^3$
$\mu_c$	Viscosidad dinámica vapor	$Kg/(m^{\circ}s)$
$\mu_f$	Viscosidad dinámica agua	$Kg/(m^{\circ}s)$
$N_{uf}$	Número de Nusselt flujo de agua	Adimensional
$N_{uc}$	Número de Nusselt flujo de vapor	Adimensional
$Pr_f$	Número de prandtl agua	Adimensional
$Pr_c$	Número de prandtl vapor	Adimensional
$Re_f$	Número de Reynolds flujo de agua	Adimensional

<i>Rec</i>	Número de Reynolds flujo de vapor	Adimensional
<i>A<sub>i</sub></i>	Área interna de transferencia de calor	$m^2$
<i>A<sub>o</sub></i>	Área externa de transferencia de calor	$m^2$

Los subíndices c y f hacen referencia al fluido caliente (vapor) y al fluido frío (agua) respectivamente, los subíndices e y s representan la entrada o salida.

### 5.1.2 Desarrollo del modelo matemático

“El modelo matemático de un sistema dinámico se define como el conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Un modelo matemático no es único para un sistema es decir puede representarse de muchas formas diferentes dependiendo de cada perspectiva. La dinámica del sistema se describe en términos de ecuaciones diferenciales las cuales se obtienen a partir de las leyes físicas que gobiernan al sistema.” (Ogata, 2010)

La obtención del modelo matemático del intercambiador de calor es sumamente importante en el desarrollo de este proyecto ya este se tomará como base para desarrollar el sistema de control, además por medio de él podemos observar las características reales del sistema como también analizar a través de la simulación su funcionamiento, el modelo matemático se obtuvo de manera completamente analítica.

#### 5.1.2.1 Contextualización

El modelo matemático analítico se realizó basándose en los principios y leyes que se presentan en el proceso, en el caso de un intercambiador de calor estas leyes son: La transferencia de calor, la ley de la conservación de la energía y un método para análisis de

intercambiadores de calor conocido como la efectividad NTU. Por tal razón seguidamente se presenta una contextualización sobre los temas mencionados.

**Ley de la conservación de la energía:** La primera ley de la termodinámica, también conocida como ley de conservación de la energía establece que “*la energía no se crea ni se destruye; solo cambia de forma*” por lo tanto al hacer el análisis de un sistema toda forma de energía debe tenerse en cuenta. (Cengel & Ghajar, 2011)

El principio de conservación de la energía o balance de energía para un sistema establece que el cambio neto en la energía total de un sistema es la diferencia entre la energía total que entra al sistema y la energía total que sale del sistema (ec.1).

$$\begin{bmatrix} \text{energía total} \\ \text{que entra} \\ \text{al sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{energía total} \\ \text{que sale} \\ \text{del sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{bmatrix}$$

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E \quad \text{ec. 1}$$

En un intercambiador de calor pueden existir diferentes formas de energía las cuales son energía cinética, energía potencial y energía interna, la suma de estas formas de energía conforma la energía total del sistema la cual se denota por la letra E. Esta energía se puede considerar en dos grupos los cuales son energía macroscópica y microscópica. Las formas macroscópicas son las que poseen un sistema con relación con un marco de referencia exterior, como las energías cinética y potencial, y Las formas microscópicas son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema. La suma de todas estas formas de energía se denomina energía interna y se denota mediante U. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$U = mcpT$$

De manera que:

$$E = U + EC + EP$$

La energía se transfiere de un medio a otro en dos principales formas las cuales son calor y trabajo, un intercambio de energía corresponde a un intercambio de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura de lo contrario es trabajo. También se puede presentar el intercambio de energía mediante la transferencia de masa puesto que cada vez que esta se transfiere hacia adentro o hacia afuera de un sistema el contenido de energía de la masa también se transfiere. (Cengel & Michael, 2012)

Los intercambiadores de calor implican un flujo de masa hacia adentro y hacia afuera del sistema que se le conoce como volumen de control. El cual se analiza en condiciones estacionarias de operación. Es decir que no presenta ningún cambio con el tiempo en una ubicación específica. A su vez el contenido de energía en un volumen de control durante un proceso de flujo estacionario permanece constante es decir no presenta ningún cambio en la energía total. Por lo tanto, la cantidad de energía que entra al sistema en cualquier forma (calor, trabajo, masa) es igual a la cantidad de energía que sale de él. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$E_{ent} = E_{sal}$$

**Transferencia de calor:** La transferencia de calor es una ciencia básica que trata sobre la rapidez de transferencia de energía térmica. La cual se da debido a diferentes fenómenos a los cuales se les conoce como mecanismos de transferencia de calor. El calor es una forma de energía por lo tanto tiene unidades de energía como KJ y se denota por la letra  $Q$ , la tasa de transferencia de calor (cantidad de calor transferida por unidad de tiempo) se conoce como  $\dot{Q}$ .

Esta transferencia de calor se logra siguiendo 3 principios los cuales son conducción, convección y radiación; pero en el análisis de intercambiadores de calor el principio de la radiación se puede considerar despreciable. A continuación, se presentan los principios de la conducción y la convección, que fueron tenidos en cuenta en el análisis realizado. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Principios de transferencia de calor en intercambiadores de calor:** Conducción: es la transferencia de energía de las partículas más energéticas hacia las adyacentes menos energéticas. La razón de esta transferencia depende de la configuración geométrica de este, el tipo de material, el espesor, como también de la diferencia de temperatura a la que este expuesto. (Cengel & Ghajar, 2011)

Se define la razón de transferencia de calor por conducción como “la razón de la conducción de calor a través de una placa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esta capa” (ec. 2). (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_{cond} = KA \frac{T_1 - T_2}{\Delta r} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad \text{ec. 2}$$

Donde K es la conductividad térmica del material.

Teniendo en cuenta que la zona de transferencia de calor en el intercambiador de calor tiene una forma cilíndrica y que la razón de transferencia de calor depende de ello, la ecuación para la transferencia de calor se expresa de la siguiente forma (ec. 3):

$$\dot{Q}_{cond} = -KA \frac{dT}{dr}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 2\pi LK \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{D_o}{D_i}} = \frac{\Delta T}{R} \quad \text{ec. 3}$$

$$R = \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi LK}$$

Donde:

Do, Di: diámetros externo e interno de la capa cilíndrica.

L: largo de la capa cilíndrica.

R: resistencia térmica a la conducción de la capa cilíndrica.

Convección: es el intercambio de energía térmica que se da cuando sobre una superficie solida se encuentra un líquido o un gas en movimiento. (Cengel & Ghajar, 2011)

La convección se puede dividir en convección forzada y convección natural; la convección forzada se da cuando el fluido es forzado a fluir sobre una superficie o ducto por cualquier fuerza externa como un ventilador o una bomba, en cambio es convección natural si el movimiento es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias en las densidades debido a los cambios en la temperatura en el fluido. (Cengel & Ghajar, 2011)

En el intercambiador de calor de tubos-coraza nos encontramos con los dos tipos de convección, forzada entre los fluidos y el interior de los tubos y la coraza, y natural entre la coraza y sus alrededores.

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa como (ec. 4):

$$\dot{Q}_{conv} = hAs(Ts - T\infty) \quad \text{ec.4}$$

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{(Ts - T\infty)}{Rconv}$$

$$Rconv = \frac{1}{hAs}$$

Donde:

h: coeficiente de transferencia de calor por convección.

As: Área superficial de transferencia de calor.

Ts: Temperatura de la superficie.

T∞: temperatura del fluido.

Rconv: resistencia térmica a la convección

**Coefficiente de transferencia de calor por convección:** El coeficiente de transferencia de calor por convección se puede definir como “la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área por unidad de diferencia en la temperatura”, el cual no es una propiedad del fluido, sino un parámetro que se obtiene de forma experimental y que depende de los números adimensionales de Reynolds, Nusselt y Prandtl los cuales a su vez dependen de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad del mismo. (Cengel & Ghajar, 2011)

Número de Nusselt: se define como el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección y está dado por (ec. 5).

$$Nu = \frac{h \cdot D_H}{K} \quad \text{ec. 5}$$

Donde:

$K$ : conductividad térmica del fluido

$D_H$ : diámetro hidráulico

El diámetro hidráulico en un tubo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$D_H = \frac{\text{seccion transversal mojada}}{\text{perimetro mojado}} * 4$$

Número de Prandtl:

Se define por (ec. 6):

$$Pr = \frac{\text{difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{difusividad del calor}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad \text{ec.6}$$

Donde

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido

Numero de Reynolds:

Está definido como la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que posee el fluido. (ec.7)

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VDh}{v} = \frac{\rho D_H}{\mu} \left( \frac{m}{\rho \left( \frac{\pi D_H^2}{4} \right)} \right) = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D_H} \quad \text{ec. 7}$$

Donde:

V: Velocidad del fluido

v: Viscosidad cinemática del fluido

$\dot{m}$ : Flujo masico del fluido

El número de Nusselt de acuerdo a las características del flujo y basándose en resultados experimentales debido a la dificultad que resulta tratarlo en forma teórica se puede obtener de la siguiente expresión:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad \text{ec.8}$$

Donde  $n=0.4$  para el calentamiento y  $0.3$  para el enfriamiento del fluido que fluye por el tubo.

Esta expresión es válida para flujo turbulento en tubos. Flujo turbulento es aquel que presenta movimiento altamente desordenado, en general se tiene a altas velocidades y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad. En el intercambiador de calor tipo tubo-coraza se puede considerar que el flujo es turbulento ya que gracias a los deflectores que posee permiten que el flujo tome esta característica.

### **Análisis de intercambiadores de calor:**

**Coefficiente total de transferencia de calor:** En un intercambiador de calor está relacionado con dos fluidos que fluyen separados por una sola barrera. De manera que el calor se

transfiere del fluido caliente a la pared por convección, luego a través de la pared por conducción y por último de la pared al fluido frío por convección. De manera que resulta conveniente combinar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo del calor en una sola resistencia  $R$  y expresar la transferencia de calor entre los dos fluidos como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$$

Donde

$R$ : resistencia térmica total

$A_i$ : Área interior del tubo

$A_o$ : Área exterior del tubo

$U_i$ : coeficiente de transferencia de la pared interior

$U_o$ : coeficiente de transferencia pared exterior

La resistencia térmica total se expresa de la siguiente forma:

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o$$

Donde:

$R_i$ : Resistencia de la superficie interna a la convección

$R_{pared}$ : Resistencia de la pared a la conducción

$R_o$ : Resistencia de la superficie externa a la convección

$$Ri = \frac{1}{hiAi}$$

$$Ro = \frac{1}{hoAo}$$

$$R_{pared} = \frac{\ln \frac{Do}{Di}}{2\pi KL}$$

Donde:

hi, ho: coeficientes de transferencia de calor por convección sobre las superficies del tubo.

K: conductividad térmica del material

Do: diámetro externo del tubo

Di: diámetro interno del tubo

L: longitud del tubo

UAs es el coeficiente total de transferencia de calor por unidad de área y se expresa como ( ec. 9):

$$\frac{1}{UAs} = R = \frac{1}{hiAi} + R_{pared} + \frac{1}{hoAo}$$

$$UAS = \left( \frac{1}{hiAi} + R_{pared} + \frac{1}{hoAo} \right)^{-1} \quad \text{ec.9}$$

**Método de la efectividad NTU:** Es el método de análisis más adecuado para aplicar cuando se tiene un intercambiador de calor específico del cual se conocen sus variables de entrada como los flujos máxicos de los fluidos y las temperaturas de entrada de estos, pero de desconocen las variables de salida.

Este método se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor  $\varepsilon$  definido por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\text{razon de la transferencia de calor real}}{\text{razon maxima de transferencia de calor}} \quad \text{ec.10}$$

La razón de la transferencia de calor real de un intercambiador se puede determinar en base a un análisis de la energía en el fluido frío o caliente y se expresa como:

$$\dot{Q} = C_c(t_{ce} - t_{cs}) = C_f(t_{fs} - t_{fe}) \quad \text{ec.11}$$

Donde:  $C_c = \dot{m}_c * cp_c$  y  $C_f = \dot{m}_f * cp_f$  son las razones de capacidad calorífica de los fluidos caliente y frío respectivamente.

La transferencia de calor máxima depende de la diferencia de temperatura máxima que existe en el intercambiador de calor. La cual es la diferencia entre las temperaturas de entrada de los dos fluidos y de la capacidad calorífica mínima de los fluidos. De modo que la transferencia de calor máxima se expresa como:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(t_{ce} - t_{fe}) \quad \text{ec. 12}$$

Donde  $C_{min}$  es el menor entre  $C_c$  y  $C_f$ .

Las relaciones para la efectividad de un intercambiador ya han sido desarrolladas y se representan de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c} \quad (\text{Flujo paralelo}) \quad \text{ec. 13}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c * \exp[-NTU(1-c)]} \quad (\text{Contraflujo}) \quad \text{ec. 14}$$

$$\varepsilon = 2\{1 + c + \sqrt{1 + c^2} * \frac{1 + \exp[-NTU * \sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU * \sqrt{1 + c^2}]}\}^{-1} \text{ (Flujo mixto) } \quad \text{ec. 15}$$

En donde NTU es el número de unidades de transferencia y se expresa por:

$$NTU = \frac{UAs}{C_{min}} \quad \text{ec. 16}$$

Y C es la relación de capacidades dada por:

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \text{ec. 17}$$

### 5.1.2.2 Desarrollo

Para facilitar el análisis y el estudio del sistema se realizaron las siguientes suposiciones basadas en el comportamiento físico y dinámico del sistema:

- Energía cinética y potencial constantes.
- Perdidas hacia el exterior despreciables.
- El proceso está a presión constante.
- Calores específicos constantes.
- Densidades constantes.
- Viscosidad constante.
- Conductividad térmica constante.

Adicional a esto se considera que los fluidos no presentan ningún cambio de fase durante el proceso y que los flujos masicos de entrada son iguales a los flujos masicos de salida.

**Balance de energía:** Aplicando la ecuación 1 de balance de energía sobre los dos fluidos se obtuvo:

Fluido frio

$$m_f C_{p_f} \frac{dT_{fs}}{dt} = \dot{m}_f C_{p_f} T_{fe} - \dot{m}_f C_{p_f} T_{fs} + \dot{Q} \quad \text{ec.18}$$

Fluido caliente

$$m_c C p_c \frac{dT_{cs}}{dt} = \dot{m}_c C p_c T_{ce} - \dot{m}_c C p_c T_{cs} - \dot{Q} \quad \text{ec. 19}$$

El valor de la tasa de transferencia de calor  $\dot{Q}$  depende de la configuración de flujos, este se halló mediante el método de la efectividad NTU para lo que, se deben determinar las constantes requeridas para el desarrollo, las cuales se presentan en la tabla 2.

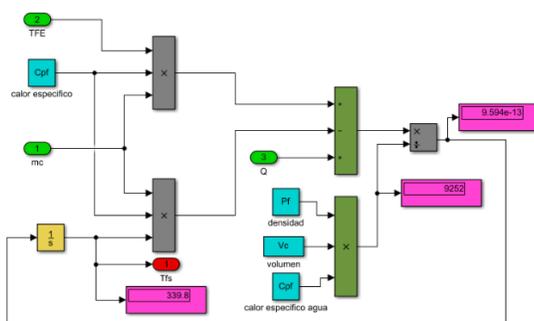
Las constantes dependen de las temperaturas de entrada del proceso las cuales para el flujo de vapor tiene un valor de 433 k y de 298 k para el flujo de agua.

**Tabla 2. Constantes**

Constante	Agua	Vapor
Cp.	4178	2314
Densidad	996	2.546
K	0.615	0.0316
Pr	5.42	1.02
$\mu$	0.000798	0.00001399
Ai	0.8528	
Ao	0.912	
DHt	0.02375	
DHc	0.02084	
Rpared	0.0000233	
L	1.143	
Di	0.02375	
Do	0.0254	
Dcoraza	0.1193	

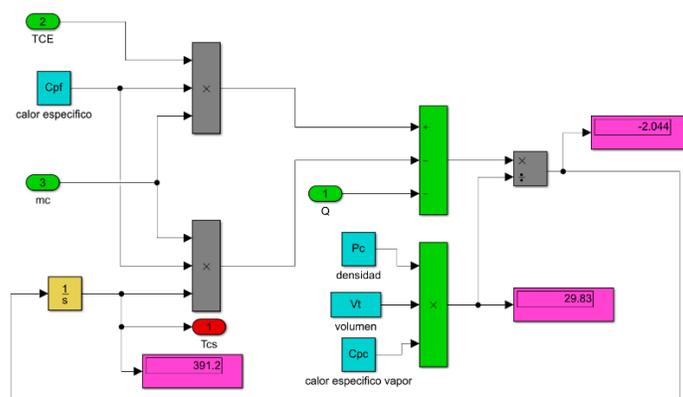
**Simulación:** se realizó la simulación en Simulink de cada una de las ecuaciones que componen el proceso:

**Balance de energía:** la figura 11 corresponde a la simulación de la ecuación 18 perteneciente al balance de energía en el flujo de agua.



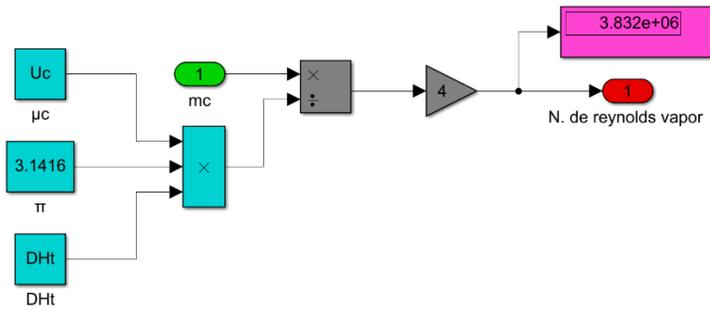
**Figura 11. Balance de energía fluido frio**

La figura 12 corresponde a la simulación de la ecuación 19 y representa el balance de energía en el flujo de vapor.

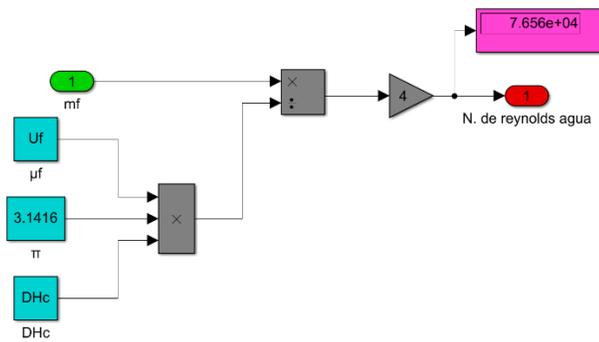


**Figura 12. Balance de energía fluido caliente**

**Número de Reynolds:** a partir de la simulación de la ecuación 7 se obtiene el número de Reynolds para los dos fluidos.



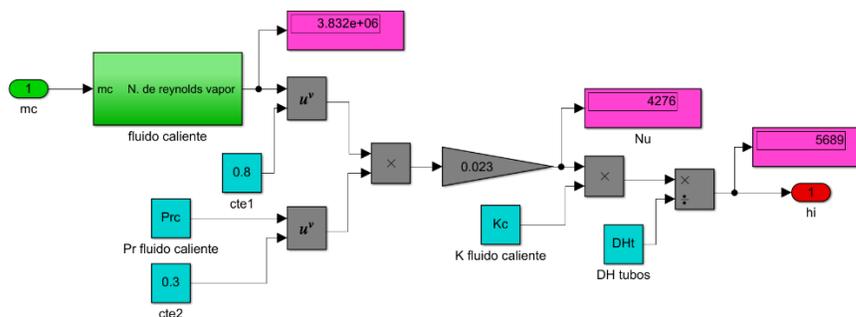
**Figura 13. Numero de Reynolds flujo de vapor**



**Figura 14. Numero de Reynolds flujo de agua**

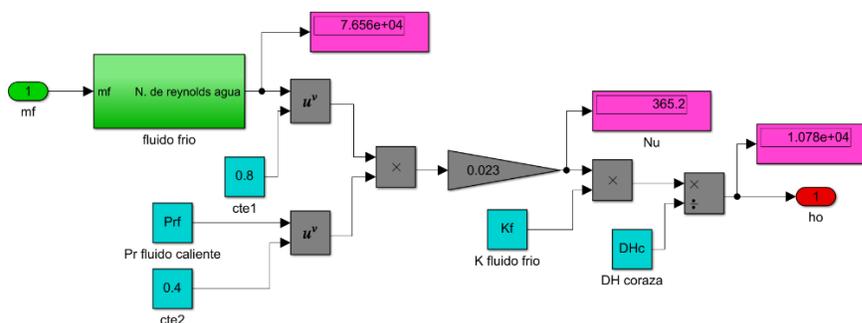
La figura 13 representa el número de Reynolds para el flujo de vapor y la figura 14 el número de Reynolds para el flujo de agua.

**Coefficientes de transferencia de calor por convección:** se simulan las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 para obtener el coeficiente de calor por convección sobre las dos superficies de la zona de intercambio de calor.



**Figura 15. Coeficiente convectivo interno.**

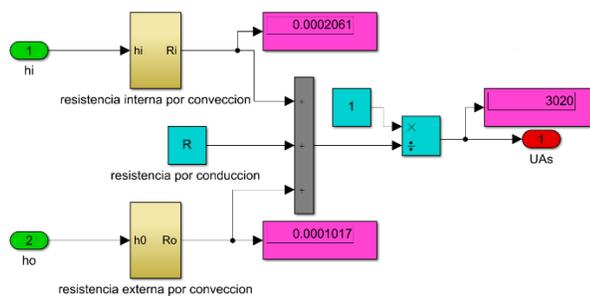
La figura 15 representa el coeficiente de transferencia de calor por convección en la parte interna de la zona de intercambio de calor.



**Figura 16. Coeficiente convectivo externo**

La figura 16 representa el coeficiente de transferencia de calor por convección en la parte externa de la zona de intercambio de calor.

**Coefficiente total de transferencia de calor por unidad de área (UAs):** se simula la ecuación 9.

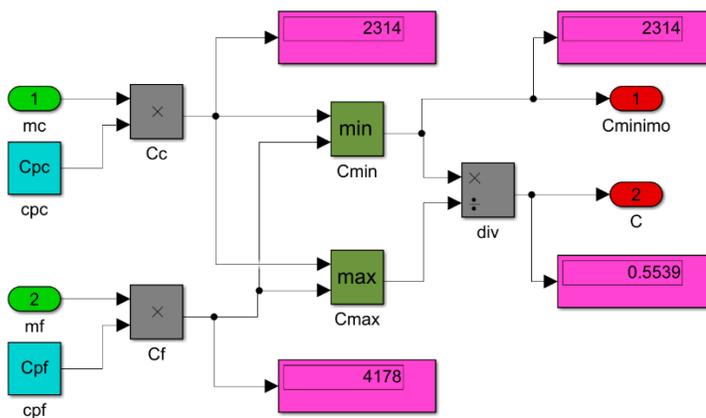


**Figura 17. Coeficiente total de transferencia de calor**

La figura 17 representa el coeficiente total de transferencia de calor sobre la superficie de intercambio de calor.

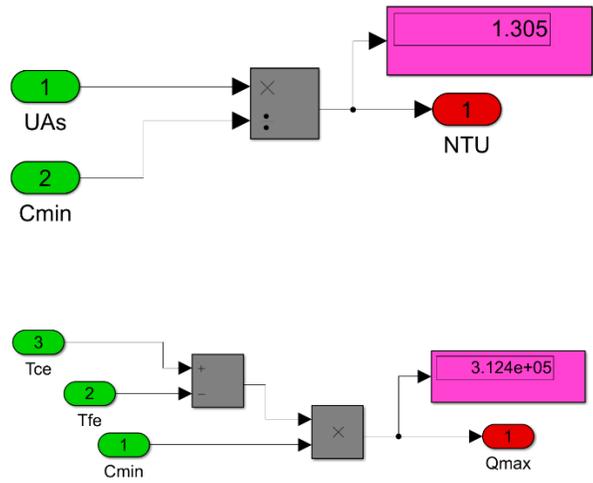
### Capacidad calorífica, número de unidades de transferencia y transferencia de calor

máxima:



**Figura 18. Capacidad calorífica**

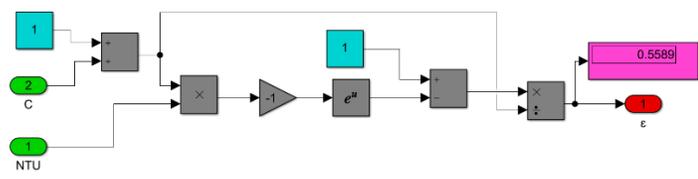
La figura 18 representa la capacidad calorífica de cada fluido, de donde se obtiene la capacidad calorífica mínima y la relación de capacidades caloríficas.



**Figura 19. Unidades de transferencia, transferencia de calor máxima**

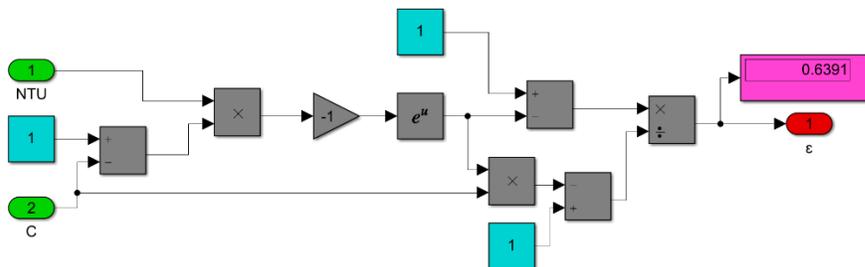
La figura 19 representa la simulación de las ecuaciones 16 y 12 para el número de unidades de transferencia y la tasa de transferencia de calor máxima.

**Relación de efectividad:** se simularon las ecuaciones 13, 14 y 15 las cuales son las correspondientes a la efectividad en las 3 configuraciones de flujo.



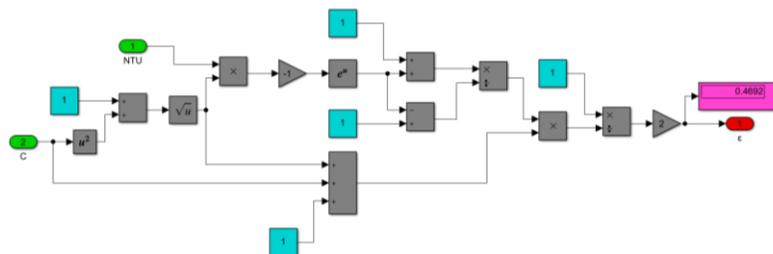
**Figura 20. Efectividad flujo paralelo**

La figura 20 representa la ecuación 13 para la efectividad en flujo paralelo.



**Figura 21. Efectividad contraflujo**

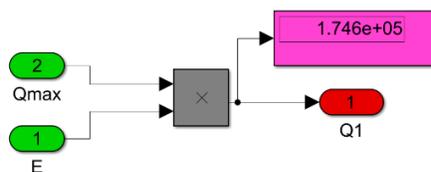
La figura 21 representa la ecuación 14 para la efectividad en contraflujo



**Figura 22. Efectividad flujo mixto**

La figura 22 representa la ecuación 15 para la efectividad en flujo mixto.

**Tasa de transferencia de calor real:** se obtiene a partir de la ecuación 11 (figura23) y representa el calor que pasa de un fluido a otro.



**Figura 23. Tasa de transferencia de calor real.**

Luego de haber simulado cada una de las ecuaciones se unen cada uno de los bloques y se obtiene el modelo matemático final del proceso para cada una de las configuraciones de flujo.

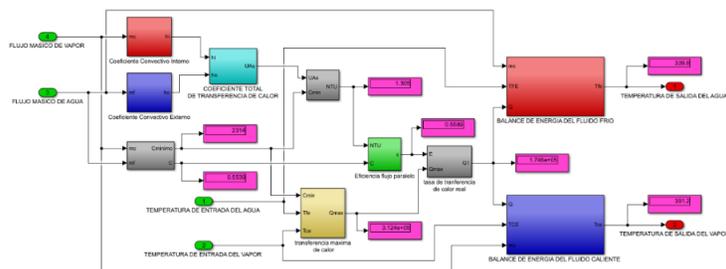


Figura 24. Modelo matemático flujo paralelo

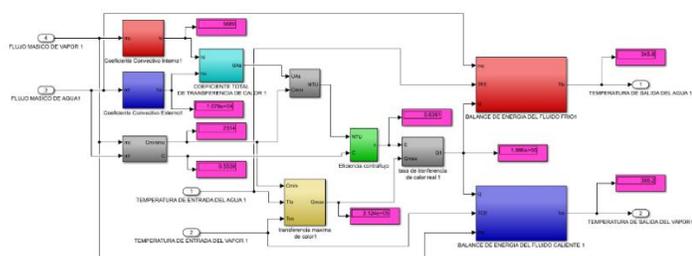


Figura 25. Modelo matemático contraflujo

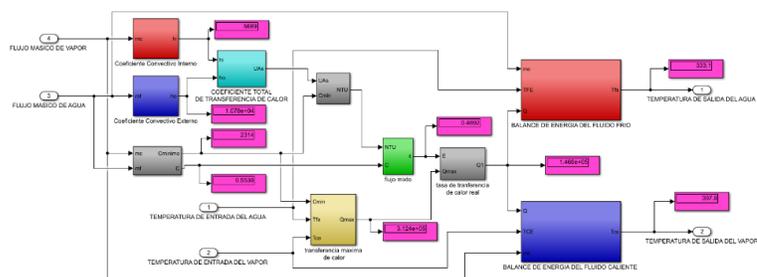


Figura 26. Modelo matemático flujo mixto

Las figuras 24, 25 y 26 representan el modelo matemático para flujo paralelo, contraflujo y flujo mixto respectivamente, los 3 modelos son bastante similares ya que solo varía la ecuación para la efectividad en cada configuración de flujo.

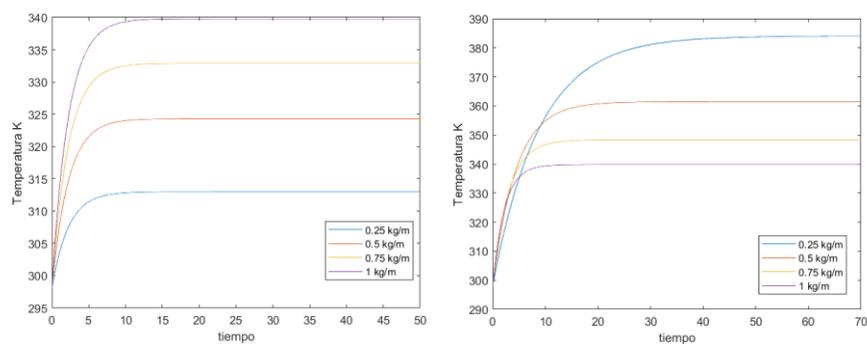
### 5.1.2.3 Resultados

**Identificación de las variables:** Una vez obtenido el modelo matemático se identifican las variables de entrada y salida que podemos medir y manipular con lo que seguidamente se realizó un análisis de estas variables para observar la respuesta de las variables de salida ante cambios en las variables de entrada. Estas variables son:

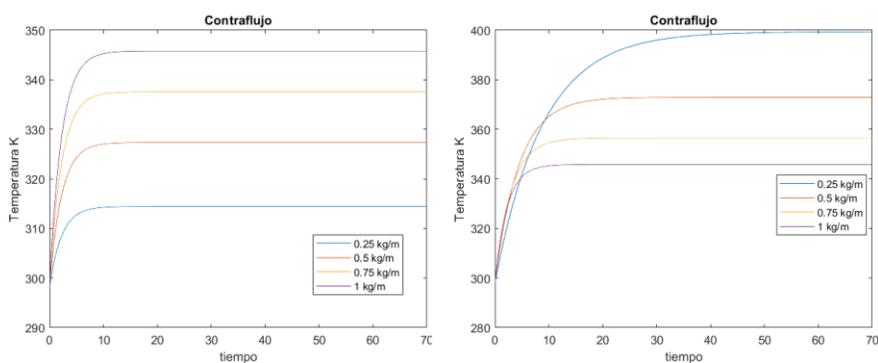
Temperatura de entrada fluido caliente, Temperatura de entrada fluido frio, flujo masico de agua y flujo masico de vapor como variables de entrada y Temperatura de salida fluido caliente, Temperatura de salida fluido frio como variables de salida. De las cuales se podrían manipular los dos flujos masicos de entrada. Las temperaturas de entrada de los fluidos no pueden ser manipuladas ya que el agua proviene de una tubería de agua a temperatura ambiente y la temperatura del vapor depende de la caldera.

**Comportamiento de las variables:** como variable de salida se toma la temperatura de salida del agua ya que es la que se utiliza con más frecuencia, es decir en la mayoría de los intercambiadores de calor la finalidad es elevar la temperatura del fluido frio hasta un valor deseado.

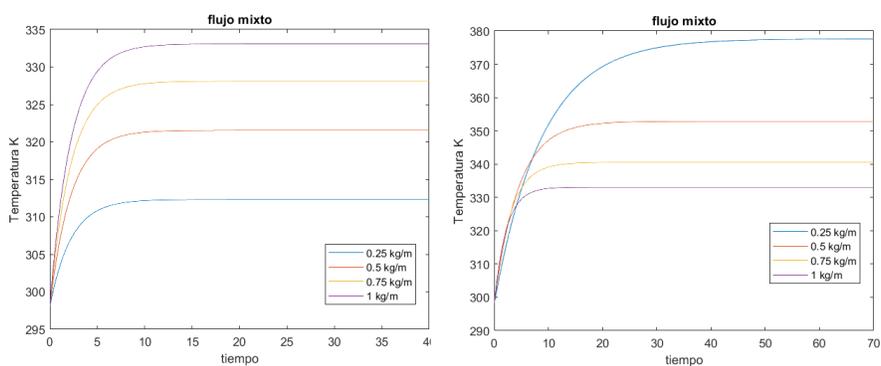
Seguidamente se observa la sensibilidad de las variables para lo cual se varía el valor de los flujos de entrada uno a uno y se grafica la salida para los diferentes valores.



**Figura 27. Temperatura de salida agua variando los flujos de entrada para flujo paralelo**



**Figura 28. Temperatura de salida del agua variando los flujos de entrada para contraflujo**



**Figura 29. Temperatura de salida del agua variando los flujos de entrada para flujo mixto**

Las figuras 27,28 y 29 corresponden al comportamiento de la temperatura de salida del agua en las tres configuraciones de flujo (paralelo, contraflujo y mixto) al variar uno de los flujos de entrada manteniendo las demás variables de entrada constantes, las gráficas de la izquierda

representan la respuesta de la temperatura de salida al variar el flujo de vapor y las gráficas de la derecha al variar el flujo de agua. La temperatura del agua se mantiene constante en 298 K, la temperatura de entrada del vapor en 433 K, el flujo que permanece constante tiene un valor de 1 kg/m mientras que el flujo variable se le asignan valores de 0.25, 0,5, 0,75 y 1 kg/m.

Como se puede observar en la medida que se aumenta el flujo de vapor para un flujo constante de agua la temperatura de salida del agua aumenta y al aumentar el flujo de agua para un flujo de vapor constante la temperatura de salida del agua disminuye, lo que quiere decir que la temperatura de salida del agua es inversamente proporcional al flujo de agua y proporcional a el flujo de vapor.

La temperatura de salida del agua presenta una sensibilidad mayor al manipular el flujo de agua que al manipular el flujo de vapor, además, cuando se minimiza el flujo de vapor la variable de salida presenta valores bajos mientras que si se minimiza el flujo de agua presenta valores altos, por lo tanto, para elegir la variable a manipular para el sistema de control dependerá del valor que se quiera en la variable de salida, es decir de acuerdo a las gráficas 27, 28 y 29 si se desea un valor en la salida por debajo de los 335 °K la mejor opción será manipular el flujo de vapor, para así calentar la mayor cantidad de agua posible, mientras que si se desea un valor en la temperatura de salida mayor a 340 °K la mejor opción es manipular el flujo de agua, ya que manipulando el flujo de vapor no se alcanzaría este valor.

## 5.2 Diseño

Para cumplir con el objetivo planteado, se requieren de determinados sistemas, en el contenido de este capítulo encontrara el diseño de cada uno de estos sistemas y sus componentes.

- Sistema de control: se encarga de ajustar los valores de las variables en los valores requeridos.
- Sistema de comunicación: permite el envío de datos y señales entre las diferentes partes de proceso.
- Sistema de automatización: permite tener un manejo remoto y automático del proceso.
- sistema de monitoreo: permite tener una visualización constante de las variables del proceso
- HMI: Es la parte con la que el operario tiene contacto para controlar y monitorear desde este punto todo el proceso.
- Instrumentación: se diseñan o seleccionan los diferentes elementos necesarios para desarrollar los sistemas anteriores.

Todos los sistemas se diseñan teniendo en cuenta que la tecnología utilizada es Arduino el cual es el caso de estudio de este trabajo para finalmente determinar qué tan viable y que tan eficiente resulta el manejo de esta tecnología en este tipo de procesos.

Todo el sistema se divide en dos partes, una parte se denomina parte de control la cual estará junto a la HMI en donde se recibirá los datos de las variables y desde donde se controlara todo el proceso enviando las señales necesarias, la otra parte se llamara parte de potencia la cual estará junto al banco intercambiador de calor, y se encargara de recibir las señales desde la parte de control y transmitirla a los elementos finales de cada sistema, como también de recibir las lecturas de los sensores y enviarlas a la parte de control.

### 5.2.1 Sistema de control

El sistema de control estará dividido en dos partes:

**Control de temperatura:** Corresponde a un sistema de control en malla cerrada sobre la variable de salida o variable controlada seleccionada en el capítulo anterior, la cual fue la temperatura de salida del fluido frío, manipulando uno de los flujos de entrada.

**Control de flujo:** Se realiza un sistema de control en malla cerrada sobre el flujo de vapor, manipulando la apertura de la válvula encargada de modular este flujo, con el fin de brindar un sistema que pueda ser usado para prácticas de laboratorio o investigaciones futuras.

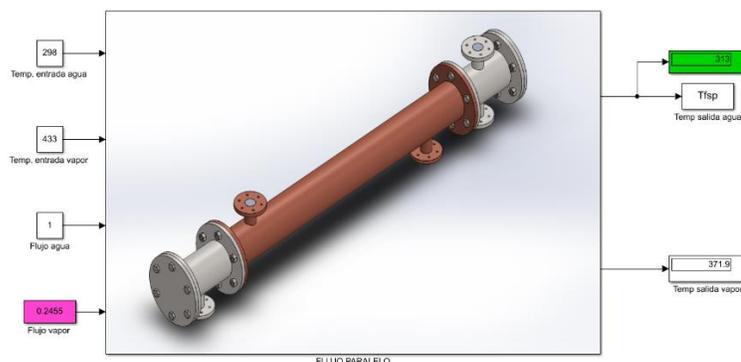
### **5.2.1.1 Control de temperatura**

Se realizó basándose en la estructura de control clásico, haciendo uso de la familia de controladores PID, para lo cual primeramente se deben establecer las variables del sistema de control, para la variable de salida o variable controlada se ha seleccionado la temperatura de salida del agua, y para la variable de entrada o variable manipulada se seleccionó el flujo de entrada de vapor, esto debido a que al realizar el control sobre un banco de pruebas en donde no está establecido un valor de trabajo para la variable de salida se debe asumir un valor, este valor fue de 40 °C equivalente a 313 °K y como se mencionó anteriormente para valores bajos en la variable de temperatura la mejor opción es manipular el flujo de vapor.

A continuación, se presenta detalladamente el paso a paso para determinar el tipo de control más adecuado para la planta.

**Cálculo del bias:** Se debe determinar el valor bias, este corresponde al valor en la variable de entrada cuando el sistema entrega el valor de referencia en la variable de salida, es

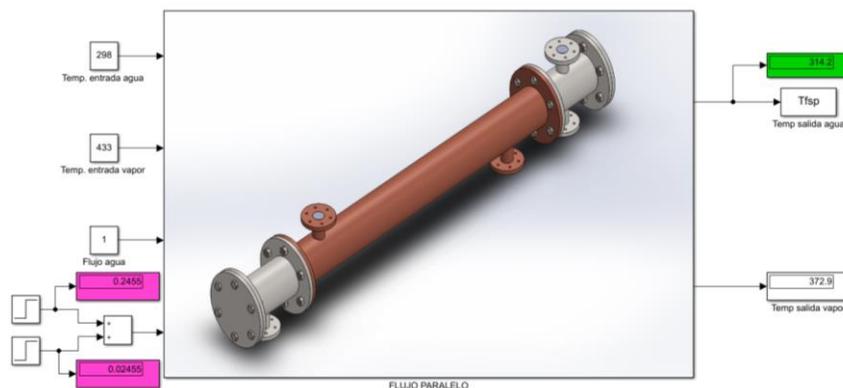
decir el valor del flujo que asegura un valor de 313 °k en la variable de salida en cada una de las 3 configuraciones de flujo.



### Figura 30. Bias

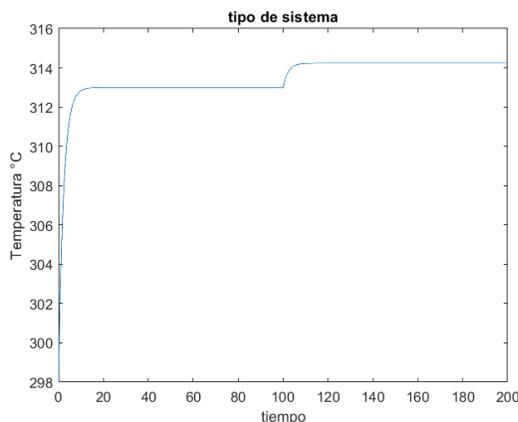
En la figura 30 se puede observar el valor del bias para la configuración de flujo paralelo el cual tiene un valor de 0,2455, para contraflujo el valor es de 0.2255 y para flujo mixto de 0.2656.

**Relación entre las variables:** Seguidamente se debe determinar la relación entre la variable de entrada y salida, es decir determinar si el sistema es proporcional o inversamente proporcional, para lo cual se debe excitar la planta ingresando un cambio escalón en un instante de tiempo  $t_0$  con el valor del bias, seguidamente en un instante de tiempo  $t$  (después de la estabilidad) se le adiciona a la entrada otra señal escalón con un valor del 20 % del bias, como se muestra en la figura 31.



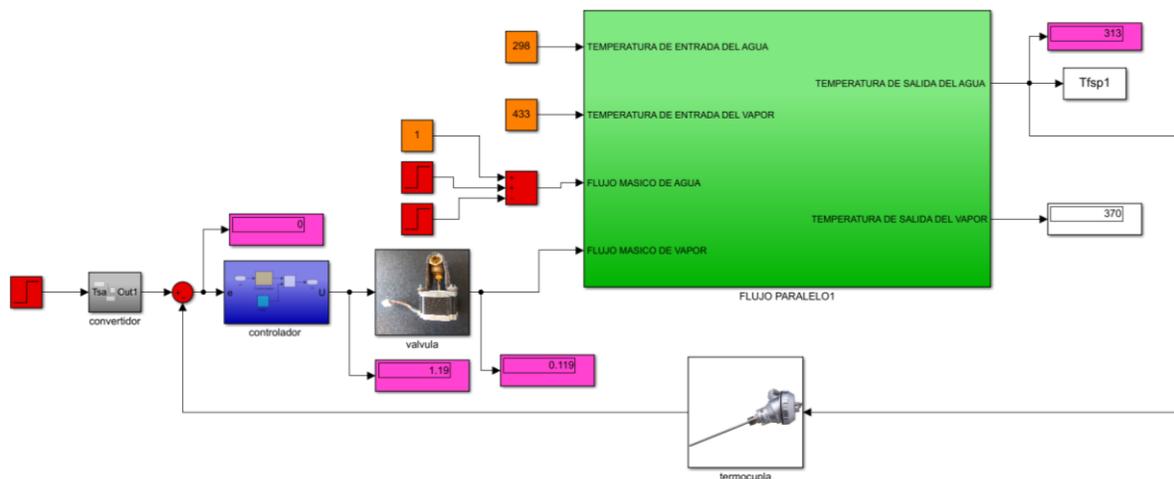
**Figura 31. Simulación para la relación de las variables de proceso**

En la figura 32 se presenta la respuesta del sistema, como se puede ver al aumentar la señal de entrada en un 20% la salida presenta un aumento en su valor por lo tanto el sistema es proporcional.



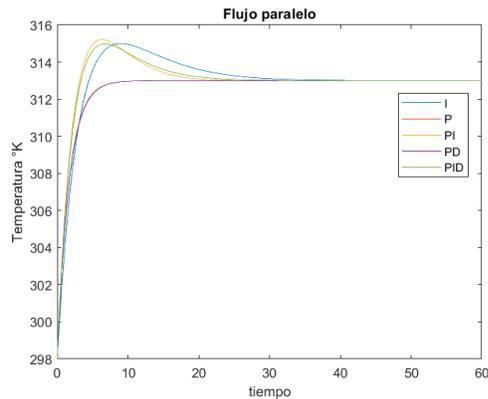
**Figura 32. Relación entre las variables del sistema**

**Estrategias de control:** seguidamente se simula el lazo de control en malla cerrada, como se muestra en la figura 33, el valor bias calculado anteriormente debe ser dividido por la constante de la planta para poder ser sumado con la señal de voltaje que sale del controlador. Este valor representa la condición inicial del sistema de control.



**Figura 33. Sistema de control malla cerrada**

Seguidamente mediante la herramienta “pid-tuner” integrada en el bloque PID, se realiza la sintonización para las 5 diferentes estrategias de control (I, P, PD, PI, PID), y se grafica la respuesta de cada uno de ellos para determinar cuál estrategia presenta mejores índices, la respuesta se puede observar en la figura 34, la cual corresponde a la configuración de flujo en paralelo.

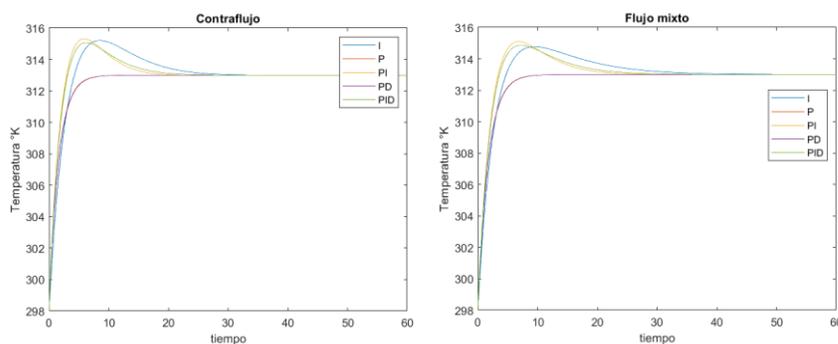


**Figura 34. Respuesta sistema para controladores PID flujo paralelo**

Seguidamente con los valores que arrojo para las constantes en la sintonización del flujo paralelo, se ingresan estos valores en el controlador de las demás configuraciones de flujo, la respuesta se aprecia en la figura 35, los valores de los controladores se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3. Constantes controladoras**

Controlador	KP	KI	KD
I	-	3.2	-
P	10.2	-	-
PI	10.53	6.887	-
PD	9.7	-	0
PID	10.43	5.76	0

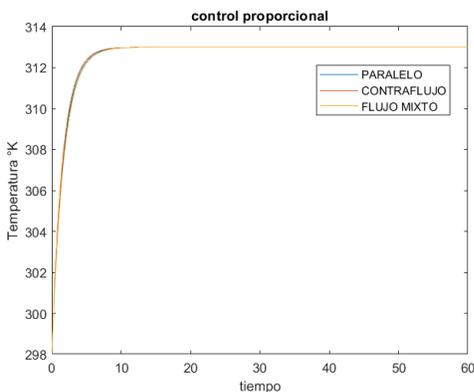


**Figura 35. Sintonización contraflujo y flujo mixto.**

Como se puede apreciar en las figuras 34 y 35 presenta bastante similitud en la respuesta de los diferentes controladores para las 3 configuraciones de flujo, en los controladores PD y PID la constante derivativa tiene un valor de 0 lo que quiere decir que el sistema no requiere constante derivativa, Por esta razón la respuesta de los controladores PI y PID son aproximadamente iguales, al igual que las respuestas de los controladores P y PD.

Con las respuestas observadas en las figuras 34 y 35 se determinó que el mejor controlador es el proporcional (P) ya que presenta menor tiempo de estabilidad y un “overshoot”

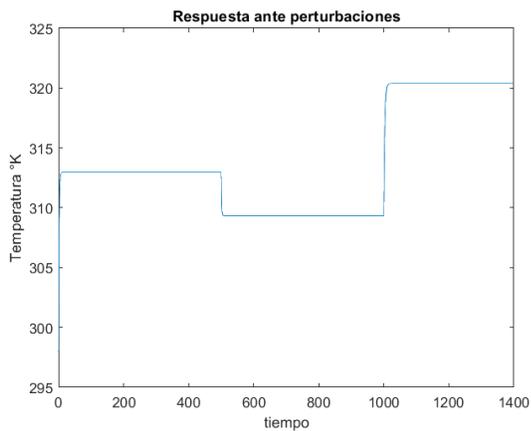
nulo, por lo que finalmente se grafica la respuesta con el controlador proporcional para las 3 configuraciones de flujo, figura 36.



**Figura 36. Respuesta control proporcional**

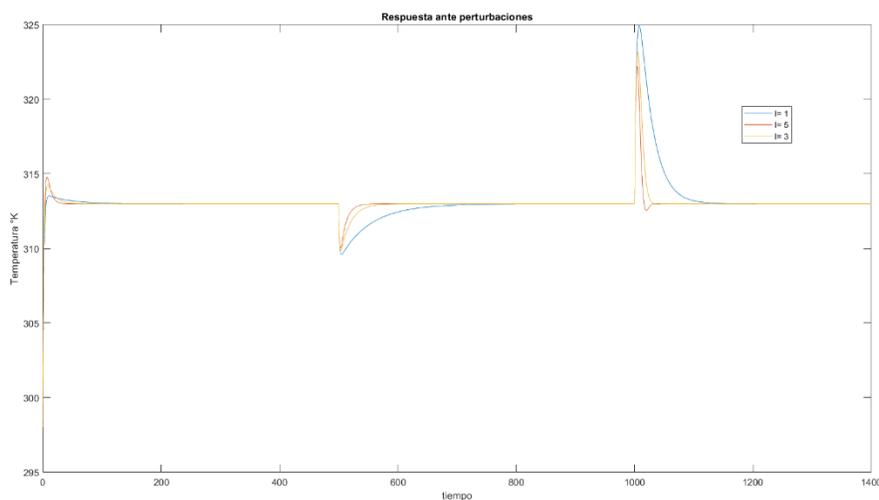
Como se puede ver la diferencia entre una configuración de flujo y otra es mínima.

Por último, se evaluó el funcionamiento del sistema de control para lo que se simuló la presencia de una perturbación ingresando en un tiempo  $t = 500$  un aumento del 50% en el flujo de agua y en un tiempo  $t = 1000$  una disminución en el flujo de agua, la respuesta se puede observar en la figura 37.

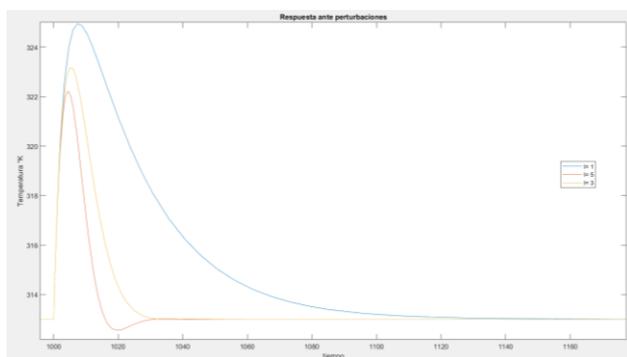


**Figura 37. Respuesta control proporcional ante perturbaciones en el flujo de agua**

Luego de realizar la simulación se encontró que el controlador proporcional no estabilizaba el sistema ante las perturbaciones, lo que significa que no sirve para el sistema, por lo tanto, se decidió pasar al control PI dejando la ganancia proporcional en el mismo valor e ir aumentando la ganancia integrativa hasta obtener una estabilidad, esta respuesta se puede observar a continuación (figura 38 y 39).



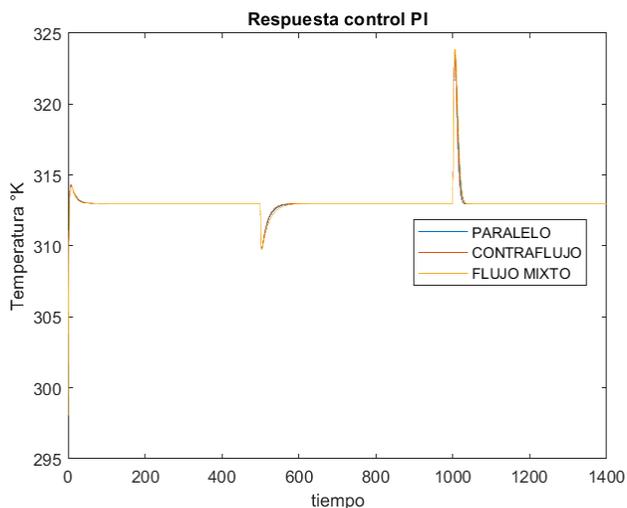
**Figura 38. Ajuste ganancia integrativa controlador PI**



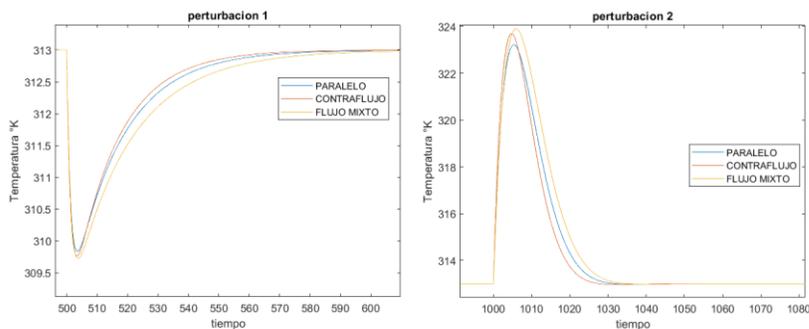
**Figura 39. Zoom ajuste ganancia integrativa.**

Como se puede observar en la figura 39 se le ingresaron valores de 1, 3 y 5 a la ganancia integrativa, en donde con 1 presenta un tiempo de estabilidad muy alto, con 5 empieza a presentar oscilaciones y con 3 presenta un tiempo de estabilidad bajo y no presenta oscilaciones,

por lo que finalmente el controlador usado fue PI con 10.2 de ganancia proporcional y 3 de ganancia integrativa, la respuesta final para las 3 configuraciones de flujo se presenta en las figuras 40 y 41.



**Figura 40. Respuesta final controlador PI**



**Figura 41. Respuesta final control PI ante perturbaciones**

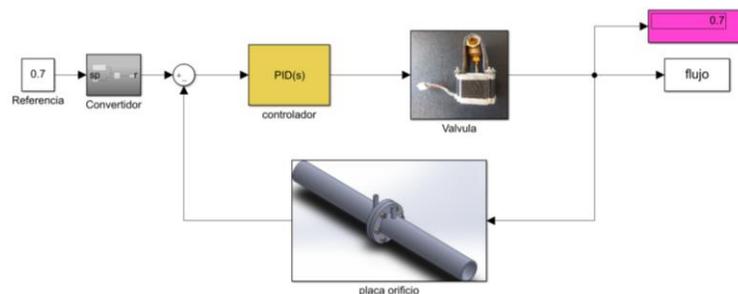
Como se puede observar para las 3 configuraciones presenta bastante similitud en la respuesta con una pequeña variación en el tiempo de estabilidad.

### 5.2.1.2 Control de flujo

En el sistema de control de flujo la válvula es el elemento final de control y al mismo tiempo la planta, ya que la variable controlada es el flujo que pasa por ella.

Para el sistema de control se realizará el modelamiento de la válvula de manera experimental, para lo que se deberá realizar un proceso en donde se tomen valores del porcentaje de apertura vs el flujo que pasa a través de ella, y a partir de estos valores, con la ayuda de Matlab obtener el modelo que mejor me represente el comportamiento de las variables sobre la válvula, para posteriormente realizar la sintonización del controlador.

En la figura 42 se puede ver el lazo de control para el sistema de control de flujo.



**Figura 42. Sistema de control de flujo en malla cerrada**

El proceso de modelar la válvula y sintonizar el controlador se presenta en la sección de implementación.

### 5.2.2 Sistema de comunicación

El sistema de comunicación es el encargado de transmitir la información desde la interfaz hombre maquina a los elementos finales del sistema y viceversa, debido a las altas temperaturas a las que se encuentra expuesto el intercambiador de calor, las que se propagan a sus alrededores se decidió que esta comunicación se haga de manera inalámbrica y así evitar estar en contacto

directo con las zonas que puedan presentar algún tipo de peligro para quien este operando el banco de pruebas.

A continuación, se presenta una tabla comparativa (tabla 4) entre los diferentes tipos de tecnologías inalámbricas con las que se podía implementar, la cual se tomó como referencia para la elección del dispositivo a utilizar. Se seleccionó el dispositivo más común de cada tecnología y se extrajo la información más relevante proporcionada por el fabricante en el “datasheet” de cada elemento, para la tecnología bluetooth el dispositivo fue el módulo bluetooth HC05, para radiofrecuencia se eligió el módulo nrf24L01 y para la tecnología wifi el módulo ESP8266 cada uno de estos módulos es compatible con Arduino.

**Tabla 4. Tabla comparativa módulos de comunicación inalámbrica**

Tecnología	wifi	Radio frecuencia	bluetooth
Banda	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Alcance	100-150m	1000m Max	10 m aprox
Velocidad	11-54 Mb/s	2 Mb/s Max	2 Mb/s Max
Precio	Bajo	Bajo	Bajo
Interferencia	Alta	Bajo	Bajo
Temperatura de trabajo	-20 a 100 °C	-40 a 85 °C	-20 a 55 °C
Voltaje de operación	3-3.6 v	3-3.6 v	2.2 - 4.2 v
Consumo	60 ma	13.5 ma	20 ma

La selección se realizó por el método de la matriz binaria para lo cual se deben seleccionar las características más relevantes, se debe asignar una identificación a cada atributo y se debe establecer la importancia de cada uno de ellos respecto a los otros.

Identificación:

A1= alcance

A2= velocidad

A3= interferencia

A4= temperatura de trabajo

A5= consumo

Importancia:

A1 y A3 son más importantes que A4 y A5

A4 y A5 son más importantes que A2

A5 es más importante que A4

A1 es más importante que A3 y A2

A3 es más importante que A2

Seguidamente se construye la matriz de atributos en donde se comparan los atributos con el fin de saber la ponderación de cada uno de ellos. Tabla 5.

**Tabla 5. Matriz de atributos**

	A1	A2	A3	A4	A5	Valor	peso
A1	0	1	1	1	1	4	0.4
A2	0	0	0	0	0	0	0
A3	0	1	0	1	1	3	0.3
A4	0	1	0	0	0	1	0.1
A5	0	1	0	1	0	2	0.2
suma						10	

Seguidamente se construyen las matrices de énfasis donde se compara cada instrumento, tabla 6 matriz de énfasis A1, tabla 7 matriz de énfasis A2, tabla 8 matriz de énfasis A3, tabla 9 matriz de énfasis A4 tabla 10 matriz de énfasis A5.

**Tabla 6. Matriz de énfasis para A1**

	W	R	B	Valor	peso
W	0	0	1	1	$W_{11}=1/3$
R	1	0	1	2	$W_{21}=2/3$
B	0	0	0	0	$W_{31}=0$
suma				3	1

**Tabla 7. Matriz de énfasis para A2**

	W	R	B	Valor	peso
W	0	1	1	2	$W_{12}=1$
R	0	0	0	0	$W_{22}=0$
B	0	0	0	0	$W_{32}=0$
suma				2	1

**Tabla 8. Matriz de énfasis para A3**

	W	R	B	Valor	peso
W	0	0	0	0	$W_{13}=0$
R	1	0	0	1	$W_{23}=1/2$
B	1	0	0	1	$W_{33}=1/2$
suma				2	1

**Tabla 9. Matriz de énfasis para A4**

	W	R	B	Valor	peso
W	0	1	1	2	$W_{14}=2/3$
R	0	0	1	1	$W_{24}=1/3$
B	0	0	0	0	$W_{34}=0$
suma				3	1

**Tabla 10. Matriz de énfasis para A5**

	W	R	B	Valor	peso
W	0	0	0	0	$W_{15}=0$
R	1	0	1	2	$W_{25}=2/3$
B	1	0	0	1	$W_{35}=1/3$
suma				3	1

Por último, se ubican los valores de los pesos obtenidos en las matrices de énfasis y los valores de cada atributo.

$$\begin{pmatrix} W \\ R \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W11 & W12 & W13 & W14 & W15 \\ W21 & W22 & W23 & W24 & W25 \\ W31 & W32 & W33 & W34 & W35 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} p1 \\ p2 \\ p3 \\ p4 \\ p5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} W \\ R \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.333 & 1 & 0 & 0.666 & 0 \\ 0.666 & 0 & 0.5 & 0.333 & 0.666 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.333 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0 \\ 0.3 \\ 0.1 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

Finalmente se multiplican las matrices y el elemento con mayor ponderación será el elegido.

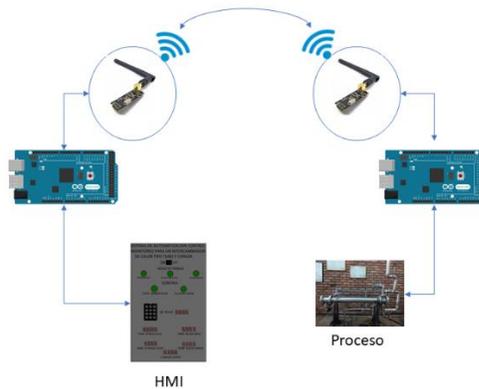
$$W=0.1998$$

$$R=0.5829$$

$$B=0.0666$$

Por lo tanto, el elemento seleccionado será el R que corresponde al módulo de radiofrecuencia NRF24101.

En la figura 43 se puede observar el diagrama del sistema:



**Figura 43. Diagrama de comunicación.**

Se requiere un módulo nrf24l01 en cada parte del sistema, uno junto a la HMI que se encarga de transmitir las señales de control al proceso y otro junto al proceso que se encarga de enviar las lecturas de los sensores a la HMI.

**Que es el módulo nrf24L01:** Es un chip de comunicación inalámbrica, que incorpora un transceptor RF (transmisor y receptor) el cual utiliza una frecuencia de 2.4 GHz.



**Figura 44. Modulo nrf24L01.**

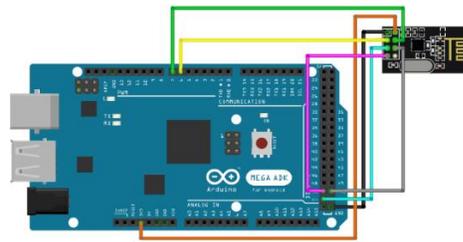
Fuente: recuperado de <https://www.luisllamas.es/comunicacion-inalambrica-a-2-4ghz-con-arduino-y-nrf24l01/>

Existen varios tipos de módulos nrf24L01 de los cuales el más completo es el que se puede ver en la figura 44, este posee un circuito amplificador de potencia junto con una antena lo

cual le permiten alcanzar distancias largas de conexión y por ende mejor intensidad de la señal en distancias cortas.

El control del módulo se hace a través del bus SPI por lo que se hace sencillo controlarlo desde Arduino ya que este posee pines para realizar dicha comunicación, los cuales son los pines MISO, MOSI y SCK, que en el Arduino mega corresponden a los pines 50, 51, y 52 respectivamente. Utiliza un voltaje de alimentación de 3.3v y posee dos pines para el control (CE, CSN) los cuales deben ser definidos en su programación y pueden ser cualquier pin digital de nuestro Arduino mega. Para el control de este módulo se requiere de las librerías nrf24L01, RF24, RF24\_config, SPI.

En la figura 45 se puede observar el diagrama de conexiones del módulo con el Arduino.



**Figura 45. Diagrama de conexiones modulo NRF 24L01**

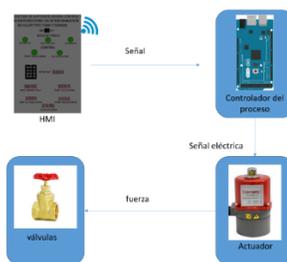
### 5.2.3 Automatización

Como ya se ha mencionado anteriormente el intercambiador de calor cuenta con 3 diferentes modos de trabajo, los cuales para cambiar de uno a otro se requiere que se cierren o abran determinadas válvulas que se encuentran instaladas en la tubería del banco por donde circulan los fluidos de trabajo, la apertura de estas válvulas se hace de manera completamente manual lo que hace que este cambio sea demorado además de que el operario se expone a posibles accidentes que se puedan presentar debido a las altas temperaturas a las que se trabaja,

por lo tanto la primera tarea a realizar es diseñar un sistema que permita que este proceso de cambio de modo de trabajo se realice de manera completamente automática.

Para permitir al operario realizar el cambio de modo de trabajo del intercambiador sin tener que estar en contacto directo con las válvulas, sino que este se haga de manera remota, primeramente, se deberá contar con válvulas que permitan dicha función, es decir, que tengan la capacidad de recibir una señal y posteriormente ejecutar la acción de abrir o cerrar según sea el caso, la selección de estas válvulas se presenta más adelante en la sección de instrumentación. Estas señales deberán ser enviadas desde la HMI del proceso en donde debe existir la posibilidad de seleccionar el tipo de configuración de flujo requerido.

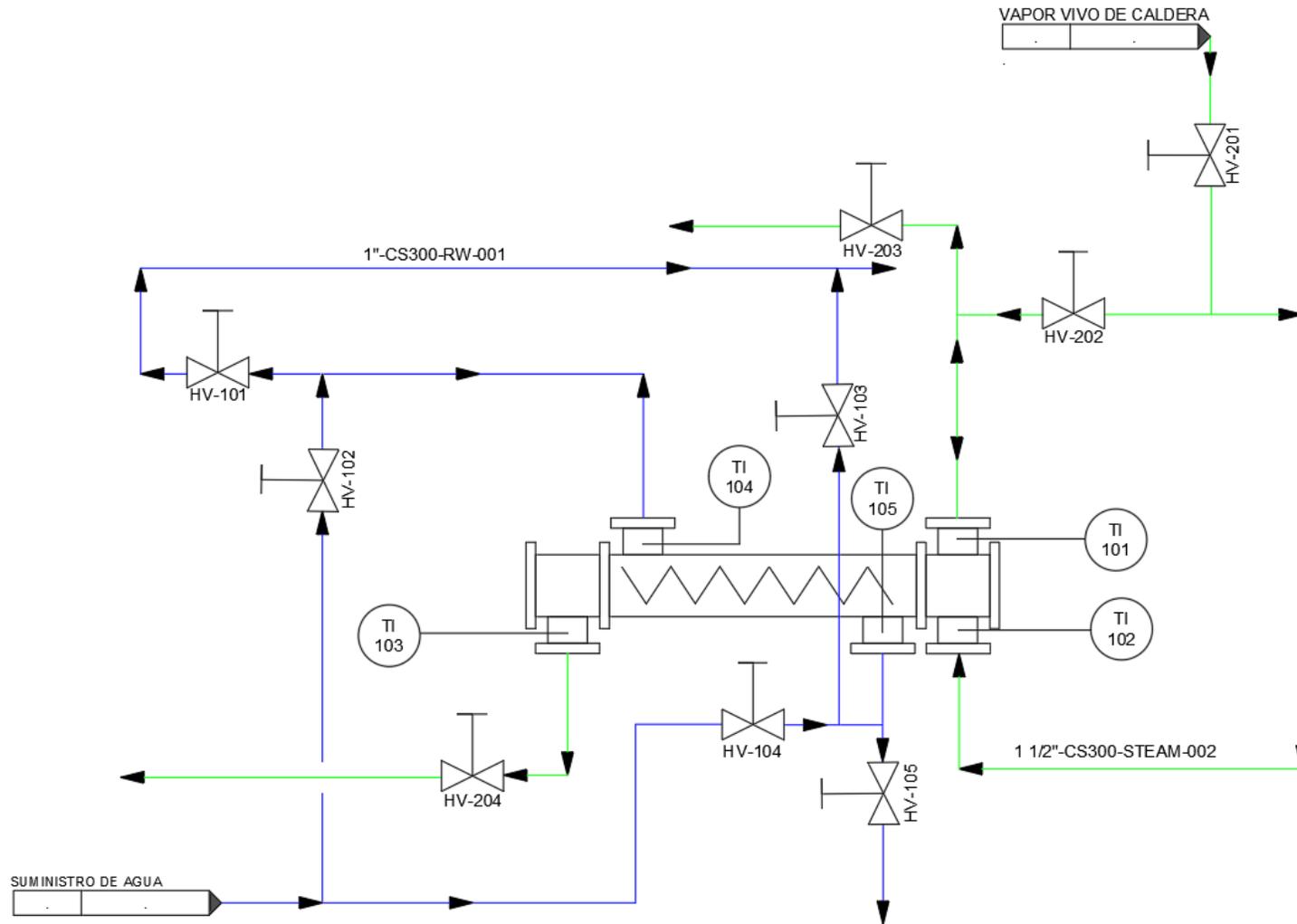
Teniendo en cuenta esto se realizó el diagrama del sistema de automatización el cual se muestra en la figura 46.



#### **Figura 46. Diagrama de automatización**

Como se puede ver se envían las señales desde la HMI al controlador, el cual las transmite al actuador de las válvulas para que estas ejecuten la acción correspondiente.

A continuación, se presenta el diagrama de instrumentación del banco de pruebas del intercambiador de calor con la nomenclatura que se va a manejar en las válvulas (figura 47).



**Figura 47. Diagrama de instrumentación antes de realizar el proyecto.**

La tubería de color verde tiene un diámetro de 1.5 pulgadas y por esta circula el vapor vivo proveniente de la caldera, las válvulas instaladas en ella HV (201, 202, 203, 204) son las encargadas de dar la dirección del flujo de vapor por la zona de intercambio de calor.

La tubería de color azul es de 1 pulgada y por allí circula el agua, las válvulas HV (101, 102, 103, 104) se encargan de establecer la dirección del flujo de agua por el intercambiador de calor, adicional se encuentra una válvula HV 105 la cual sirve como desagüe una vez el proceso termine su trabajo.

Teniendo en cuenta la información proporcionada por la placa característica del banco de pruebas las configuraciones de flujos se realizan de la siguiente manera:

Modos de trabajo:

Flujo paralelo:

Válvulas abiertas (HV 101, HV 104, HV 201, HV202, HV 204)

Válvulas cerradas (HV 102, HV 103, HV105, HV 203)

Contraflujo:

Válvulas abiertas (HV 102, HV103, HV201, HV202, HV204)

Válvulas cerradas (HV101, HV104, HV105, HV203)

Flujo mixto:

Válvulas abiertas (HV102, HV103, HV201, HV203)

Válvulas cerradas (HV101, HV104, HV105, HV204, HV202)

En la figura 43 también se puede observar 5 indicadores de temperatura T1 (101, 102, 103, 104, 105) los cuales están ubicados en cada una de las entradas y salidas de la zona de intercambio de calor del banco.

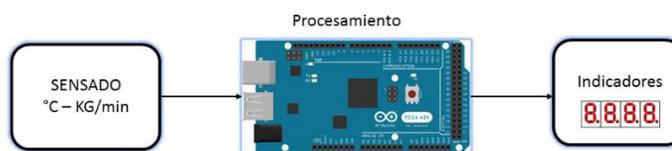
#### **5.2.4 Sistema de monitoreo**

En el proceso del intercambiador de calor existen diferentes variables que podemos medir, de las cuales las más relevantes son las temperaturas de entrada y salida de los fluidos como también sus caudales de masa o flujos volumétricos. Tener un constante monitoreo del valor de estas variables es fundamental para el desarrollo del proyecto ya que son esenciales al momento de realizar control sobre el proceso. Para poder realizar dichas lecturas se requieren elementos sensores de temperatura y caudalímetros, la selección de estos elementos se presenta en la sección de instrumentación.

Teniendo en cuenta esto el sistema de monitoreo es la parte encargada de tomar la lectura de las variables mencionadas y llevarlas hasta la parte de control del proceso en este caso la HMI, la información debe ser entregada de manera visible como también en forma de señal para poder interactuar con ella en las demás partes del proceso que las requieren.

En la figura 48 se puede apreciar el diagrama de este sistema, el cual se divide en tres partes:

La parte de sensado en donde se encuentran los elementos encargados de tomar la lectura de las variables, la parte de procesamiento que es la encargada de recibir las señales provenientes de los sensores y entregar los valores de las lecturas de las variables y la parte visual en la HMI.



**Figura 48. Diagrama de monitoreo.**

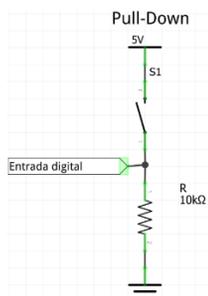
### 5.2.5 HMI

La interfaz hombre-máquina o HMI es el enlace entre el usuario y el proceso, en ella se proporciona la información requerida por el operario y se ejerce el control sobre el proceso físico. Para realizar el diseño se tomaron en cuenta las recomendaciones dadas en la norma “ANSI/ISA-101.01-2015: Interfaces Humano-Maquina para sistemas de automatización de procesos” con el fin de realizar una interfaz fácil de entender y así evitar posibles errores en la operación del proceso. A continuación, se presenta una lista de las acciones que deberá cumplir la interfaz.

- Encendido y apagado del proceso.
- Selección del modo de trabajo del intercambiador de calor.
- Selección del tipo de control.
- Ajuste “setpoint”.
- Visualización de las variables del proceso (temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos, flujo de vapor).

Se realiza una interfaz tipo modulo, para lo que se utilizan elementos como interruptores, displays, pantallas y teclados para cumplir con las funciones necesarias.

Para el encendido, selección del modo de trabajo y tipo de control se utilizarán interruptores, los cuales cada uno se conecta a una entrada digital del Arduino. Se realiza el tipo de conexión “pull-Down” como se muestra en la figura 49.



**Figura 49. Conexión de entradas digitales tipo “pull-Down”**

Como se puede ver se conecta el interruptor a un voltaje de 5v ya que Arduino utiliza la lógica TTL (5v-HIGH, 0v-LOW), mientras el interruptor se encuentra abierto la entrada toma un valor bajo o cero lógicos, y cuando el interruptor esta activo la entrada toma un valor de 5v (HIGH) o 1 lógico.

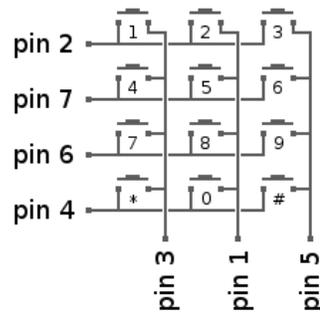
Para ingresar los valores numéricos que se requieren, en este caso el setpoint se utilizara un teclado matricial 4x3. Como el que muestra en la figura 50.



**Figura 50. Teclado matricial 4x3**

Fuente: fritzing

Este es un arreglo de pulsadores ordenados en forma de matriz. Como se puede apreciar en la figura 51.



**Figura 51. Conexión interna teclado.**

Fuente: Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/teclado-matricial-keypad/>

Para su control con Arduino se requiere de 7 pines digitales y la librería keypad. El diagrama de conexiones se puede ver en la figura 52.



**Figura 52. Conexión teclado con Arduino.**

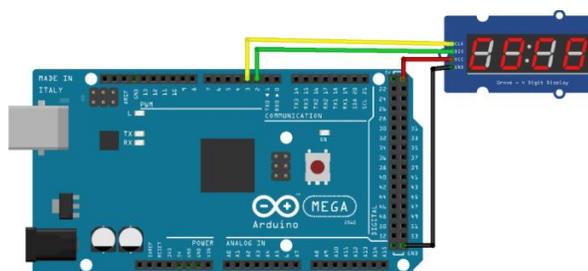
Para visualizar el setpoint y las variables necesarias, se utilizan displays 7 segmentos de cuatro dígitos, en el mercado existen muchos módulos como estos de los cuales se decidió trabajar con el que se muestra en la figura 53.



**Figura 53. Display 7 segmentos 4 dígitos.**

Fuente: recuperado de <https://cdmxelectronica.com/producto/modulo-4-digitos-7-segmentos-tm1637/>

Corresponde a un display 7 segmentos de 4 dígitos el cual posee en la parte posterior un chip TM 1637 que permite reducir el número de pines que se requieren para su control, que generalmente es 12 a 4, dos de estos pines (VCC, GND) son utilizados para alimentación 5v, los otros dos (DIO, CLK) se usan para el control de los segmentos, pueden ir conectados a cualquier pin digital de nuestro Arduino. Para el control de este display desde Arduino se requiere de la librería TM1637. A continuación, en la figura 54 se puede ver el diagrama de conexiones de este módulo.



**Figura 54. Conexión display con Arduino.**

Adicionalmente se requiere que la interfaz tenga la capacidad de guiar al operario indicándole las acciones que debe realizar e indicarle los errores y fallas en caso de que existan. Para esto se utiliza una pantalla LCD 16x2 como la que se muestra en la figura 55.



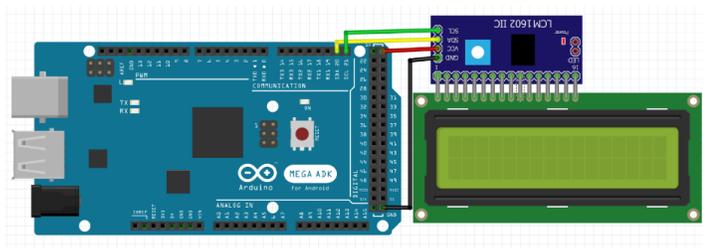
**Figura 55. Pantalla lcd 16x2.**

Para el control de esta pantalla se utiliza un driver controlador LCD I2C (figura 56), el cual es un dispositivo que nos permite controlar una pantalla LCD a través del bus I2C reduciendo el número de pines necesario de 16 a 4, dos pines de alimentación (GND-VCC) y dos pines de comunicación (SDA-SDA).



**Figura 56. Modulo i2c para pantalla lcd.**

A continuación, en la figura 57, se presenta el diagrama de conexiones con la tarjeta Arduino.



**Figura 57. Diagrama de conexión pantalla 16x2 con Arduino i2c.**

El voltaje de alimentación es de 5V y los pines SDA y SCL deben ir a los pines 20 y 21 correspondientes en la tarjeta Arduino mega.

Finalmente, en la figura 58, se muestra el diseño visual de la interfaz en donde se puede ver la ubicación que tendrá cada elemento que la compone, además de la información relevante para permitir una correcta manipulación de la misma.



**Figura 58. Diseño HMI.**

### 5.2.6 Instrumentación

La instrumentación comprende el conjunto de elementos requeridos para que el proceso funcione de una manera óptima y eficiente. Consiste en seleccionar cada uno de los implementos y dispositivos que harán parte de los demás sistemas.

Para realizar los sistemas propuestos anteriormente se requieren elementos sensores de temperatura y caudal, elementos finales de control (electroválvulas) y elementos controladores.

### **5.2.6.1 Controlador Arduino**

El controlador es la pieza más importante en el desarrollo del proyecto ya que es el encargado de recibir y distribuir la información proveniente de todos los sistemas, este recibe la información en forma de señales eléctricas ya sean análogas o digitales para luego ser procesada por su microcontrolador y finalmente distribuirla nuevamente en los demás sistemas que la requieran.

Es el punto central del proceso ya que la información no puede pasar de un sistema a otro o de un elemento a otro sin pasar primero por él, en este caso se deberá incluir un elemento de procesamiento en cada lado del proceso.

La tarjeta Arduino seleccionada debe cumplir con los siguientes requerimientos:

Comunicación spi para el módulo de radiofrecuencia

Comunicación I2C para la pantalla LCD

35 pines digitales

2 entradas análogas

Se realizó una tabla con las características de las diferentes placas Arduino que se encuentran en el mercado, tabla 11.

**Tabla 11. Características placas Arduino**

tipo	uno	Mega	due	leonardo
E/S digitales	14	54	54	20
E. análogas	6	16	12	12
S PWM	6	14	12	7
spi	si	si	si	si
I2c	si	si	si	si
Precio(dólares)	23	40.3	40.3	20.7

La elección se hace nuevamente mediante el método de la matriz binaria, donde se seleccionan las características más relevantes y la importancia de cada una de ellas frente a las demás.

A1= E/S digitales

A2= entradas análogas

A3= salidas PWM

A4= precio

A1 es más importante que A2, A3y A4

A2 es más importante que A3 y A4

A3 es más importante que A4

A continuación, en la figura 59 se muestran las tablas con las matrices correspondientes.

Matriz de atributos						
	A1	A2	A3	A4	Valor	peso
A1	0	1	1	1	3	3/6
A2	0	0	1	1	2	2/6
A3	0	0	0	1	1	1/6
A4	0	0	0	0	0	0
suma					6	1

Matriz de énfasis para A1						
	uno	Mega	Due	leo	Valor	peso
uno	0	0	0	0	0	W1=0
Mega	1	0	0	1	2	W21=2/5
due	1	0	0	1	2	W31=2/5
leo	1	0	0	0	1	W41=1/5
suma					5	1

Matriz de énfasis para A2						
	uno	Mega	Due	leo	Valor	peso
uno	0	0	0	0	0	W12=0
Mega	1	0	1	1	3	W22=3/5
due	1	0	0	0	1	W32=1/5
leo	1	0	0	0	1	W42=1/5
suma					5	1

Matriz de énfasis para A3						
	uno	Mega	Due	leo	Valor	peso
uno	0	0	0	0	0	W13=0
Mega	1	0	1	1	3	W23=3/6
due	1	0	0	1	2	W33=2/6
leo	1	0	0	0	1	W43=1/6
suma					6	1

Matriz de énfasis para A4						
	uno	Mega	Due	leo	Valor	peso
uno	0	1	1	0	2	W14=2/5
Mega	0	0	0	0	0	W24=0
due	0	0	0	0	0	W34=0
leo	1	1	1	0	3	W44=3/5
suma					5	1

$$\begin{pmatrix} uno \\ Mega \\ due \\ leo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.33 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.16 & 0.6 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.333 \\ 0.166 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Figura 59. Matriz binaria para elección del Arduino**

La cual arrojo los siguientes resultados:

Uno = 0

Mega = 0.4828

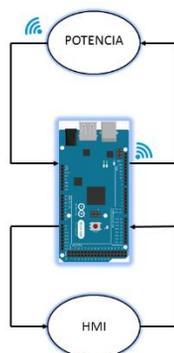
Due = 0.3219

Leo = 0.1942

Por lo tanto, la placa seleccionada fue el Arduino mega.

Seguidamente se realizó el diagrama de cada parte del proceso:

Parte de control:

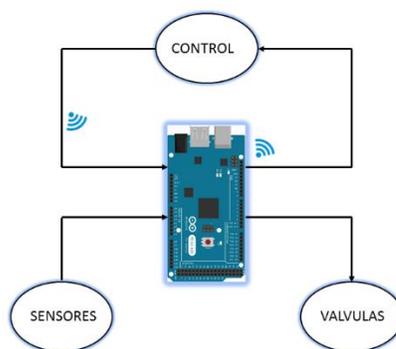


**Figura 60. Diagrama parte de control.**

La parte de control (figura 60) es la que se encuentra junto a la HMI, en esta parte el controlador se encarga de recibir las lecturas de los sensores provenientes de la parte de potencia del proceso por medio de una señal de radiofrecuencia, las cuales luego son procesadas y enviadas a los indicadores que se encuentran en la HMI.

También recibe las señales digitales provenientes de la HMI, las cuales son tratadas y enviadas nuevamente mediante una señal de radiofrecuencia hacia la parte de potencia.

Parte de potencia:



**Figura 61. Diagrama parte de potencia.**

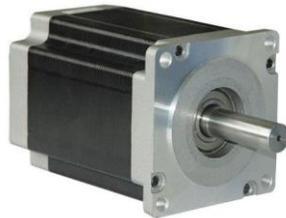
La parte de potencia (figura 61) se encarga de recibir las lecturas de los sensores instalados en el banco de pruebas, las cuales luego de ser procesadas son enviadas vía radiofrecuencia a la parte de control, por otro lado, también recibe mediante radio frecuencia las señales provenientes de la parte de control y se las transmite a las válvulas.

### 5.2.6.2 Válvulas

Para que el proceso funcione de manera automática se deben cambiar las válvulas manuales por válvulas que permitan realizar control sobre ellas es decir que tengan la capacidad de recibir una señal y ejecutar la acción que se requiera, en este caso, abrir o cerrar.

Este tipo de válvulas se conocen como electroválvulas y se encuentran fácilmente en el mercado, pero a un costo bastante elevado, por esta razón se decidió buscar una solución alternativa que sea más asequible económicamente al momento de llevar a cabo la implementación del proyecto.

Esta solución consiste en mantener las válvulas que ya se encuentran instaladas en el banco de pruebas, pero reemplazar el actuador manual con el que se realiza la apertura o cierre de las válvulas por un motor paso a paso. Este motor deberá tener la fuerza suficiente para abrir o cerrar completamente la válvula según se requiera.

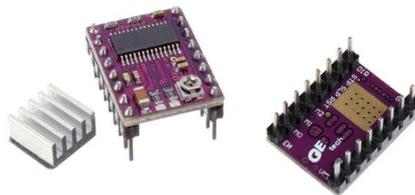


**Figura 62. Motor paso a paso.**

Fuente: recuperado de <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

Un motor paso a paso como el que se puede ver en la figura 62, es un caso especial de motor de corriente continua el cual está diseñado para poder girar un pequeño ángulo en función de una señal digital que se le aplique en sus terminales. Por lo tanto, requiere de un controlador para poder realizar esta función, en este caso se deberá programar para que gire un ángulo determinado el cual será equivalente a los grados totales que necesite la válvula a la que se encuentre conectado para su apertura, por lo que se deberá medir este ángulo con exactitud.

**Controlador motor paso a paso:** En el mercado existen diferentes drivers que simplifican el control de motores paso a paso desde un controlador como Arduino. De los cuales se decidió trabajar con el driver DRV8825 ya que es la versión más avanzada de estos. En la figura 63 se puede observar este módulo.



**Figura 63. Modulo DRV8825.**

Fuente: recuperado de <https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>

El driver drv8825 nos permite trabajar con los altos voltajes y corrientes que se requieren en este caso, además de que nos permite limitar la intensidad de corriente que circula por el motor para protegerlo y evitar que pueda ser dañado.

Para su control desde Arduino solo se necesita de dos salidas digitales una para indicar el sentido de giro y otra para indicar el número de pasos que deberá avanzar según se requiera.



la placa Arduino, los pines RESET y SLEEP deben ir conectados entre sí, por último el módulo también posee tres pines (M0, M1, M2) llamados microstepping los cuales sirven para cuando se requiera precisiones menores al ángulo nominal de un paso del motor, esta función no se requerirá en este caso por lo cual estos pines estarán desconectados.

Se requiere de un motor paso a paso con su respectivo controlador para cada una de las válvulas que se encuentran en el banco de pruebas.

### **5.2.6.3 Sensores de temperatura**

Como se pudo ver en el diagrama de instrumentación el intercambiador de calor cuenta con 5 tomas de temperatura ubicadas en todas las entradas y salidas del proceso, en estas se encuentran instalados indicadores de temperatura análogos los cuales se encargan de medir las temperaturas de entrada y salida de los fluidos de trabajo una vez entran o salen de la zona de intercambio de calor del banco de pruebas.

Cómo se ha venido mencionando para realizar los demás sistemas se requiere que los medidores de estas temperaturas tengan la capacidad de entregarnos esta medida en forma de señal para poderla transmitir a nuestro controlador Arduino y así poderla utilizar en los diferentes sistemas. Por lo tanto, se deberán reemplazar los indicadores de temperatura presentes por sensores que nos permitan realizar esta función.

Para realizar la selección de este sensor primero debemos tener en cuenta los requerimientos que debe cumplir:

Rango de temperatura: los fluidos que circulan por el intercambiador de calor son agua y vapor, el agua proviene de una tubería que se encuentra a temperatura ambiente por lo que la

temperatura menor que deberá medir será de más o menos 25 °c, por el otro lado está el vapor el cual proviene de una caldera y su temperatura de salida promedio se encuentra alrededor de los 160°C, teniendo en cuenta esto el rango de medida será de 25-160 °c aproximadamente.

Resistencia química y requisitos de instalación: para su instalación se dispone de tomas de temperatura con una profundidad de 7 cm y un diámetro de 1 cm, la condición más extrema se realizará en la medida de la temperatura del vapor ya que este circula a velocidades considerablemente altas, además de que los materiales en contacto con el estarán expuestos a la corrosión. También deberán tener una distancia de aproximadamente 1m hasta donde se encuentra el controlador.

Existen varios tipos de sensores de temperatura que pueden cumplir con esta función de los cuales los que más se ajustan a los requerimientos son las termocuplas, ya que son las más comunes, económicas y de fácil instalación que existen. Estos elementos son ideales para distancias cortas y cuando no se requieran precisiones en el orden de las decimas de grados centígrados ya que por lo general tienen un error que oscila entre los 0.5°.

Las termocuplas se pueden encontrar de diferentes tipos, los cuales se clasifican de acuerdo al tipo de material que estén construidas, estos materiales determinan el rango de temperatura, el error y la sensibilidad del instrumento.

Se seleccionó la termocupla tipo K, el cual está construido de cromel, una aleación de cromo y aluminio, y de alumen el cual es una aleación de aluminio y níquel. Tiene un rango de temperatura entre los -200 y los 1250 °C (cumple con el rango requerido) y una sensibilidad de aproximadamente 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , aunque este puede variar de acuerdo al grosor de los conductores.

Para cumplir con las condiciones de instalación y resistencia química se deberá utilizar una termocupla con termopozo, como la que puede apreciar en la figura 66.



**Figura 66. Termocupla**

Fuente: recuperado de [https:// http://www.metroinstruments.com/termocuplas-rtds-y-sensores-de-temperatura/](https://http://www.metroinstruments.com/termocuplas-rtds-y-sensores-de-temperatura/)

Como se puede ver el termopozo es un cilindro metálico, generalmente construido de acero inoxidable por su alta compatibilidad química, dentro de él se encuentra la sonda de la termocupla, de esta manera se protege a la unión ante la corrosión y el desgaste.

Termocuplas como estas se pueden encontrar de diferentes tamaños, diámetros y largos, pero sería bastante difícil y costoso encontrar una que se ajuste a nuestros requerimientos puesto que la toma de temperatura ya existe, por esto se ha decidido que serán fabricadas, este proceso de fabricación se presentara en el siguiente capítulo.

Otra razón por la que se ha decidido trabajar con este tipo de termocuplas es debido a la existencia en el mercado del módulo max6675, figura 67.

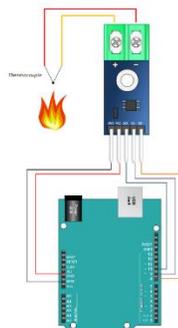


**Figura 67. Modulo max-6675.**

Fuente: recuperado de <https://ssdielect.com/es/arduino-y-compatibles-1/1049-md-max6675.html>

El módulo max-6675 es un módulo diseñado para termocuplas tipo K que integra un microcontrolador y la electrónica necesaria para amplificar y convertir a digital el voltaje generado por la termocupla, y de esta manera facilitar la conexión de este sensor con un microcontrolador como Arduino, para esta tarea solamente se requiere de la librería MAX6675.

En la figura 68 se presenta el diagrama de conexiones con la tarjeta Arduino.



**Figura 68. Diagrama de conexión modulo Max 6675 con Arduino.**

Fuente: recuperado de <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=461396.0>

Como se puede ver posee 5 pines, 2 alimentación (GND, VCC) los cuales van conectados con GND y 5v de la placa Arduino y 3 pines para el control que pueden ir a cualquier pin digital del Arduino.

#### 5.2.6.4 Medidores de caudal

La medición de caudal se hará solamente al flujo de vapor ya que el flujo de agua será constante durante todo el proceso y no requiere que sea medido. La tubería de vapor tiene un diámetro interno de 41 mm y por allí circula vapor a una velocidad relativamente alta.

En el mercado podemos encontrar diferentes medidores de caudal o caudalímetros que podrían realizar dicha función, pero dadas las circunstancias de que la tubería es un poco grande se requerirá de un caudalímetro proporcional a esta tubería lo que implica un alto costo con el que no se cuenta para la implementación, por esto se decidió utilizar el método de la placa orificio, el cual es menos costoso y práctico. Para el diseño y la implementación de sistemas de medición de caudal en tuberías por el método de la placa orificio existe un reglamento técnico que lo rige el cual es la norma ISO 5167-2 2003 “Medición del flujo del fluido por medio de dispositivos de presión diferencial insertados en conductos circulares de sección transversal que funcionan completamente parte 2: placas de orificio.” A continuación, se presenta la metodología que se debe seguir y su diseño.

#### Cálculos placa orificio

**Principio de medición y metodología:** Se basa en la instalación de una placa con un orificio en la tubería por donde circula un fluido. La presencia de esta placa provoca una diferencia de presión estática entre los dos lados de la placa, los cuales se conocen como lado de aguas arriba y lado de aguas abajo; el caudal de masa se puede calcular usando la ecuación 1 de la norma ISO 5167-2: 2003:

$$qm = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad \text{ec 1}$$

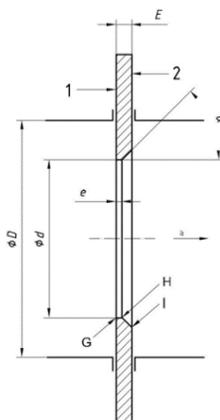
$\rho_1$  es la densidad del fluido a las condiciones de trabajo.

El coeficiente de descarga  $C$  depende del número de Reynolds, el cual a su vez depende de  $q_m$ . y debe ser obtenido por iteraciones. Este proceso se hace apoyados en el anexo A de la norma ISO 5167-1: 2003 donde encontramos la orientación para la elección del proceso de iteración y las estimaciones iniciales.

### Geometría de la placa

La parte de la placa en el interior de la tubería debe ser concéntrica con el eje central del tubo. Las caras de la placa deben ser planas y paralelas.

En la figura 69 se puede observar la geometría estándar para la fabricación de la placa orificio.



**Figura 69. Estándar placa orificio**

Fuente: norma ISO 5167-2:2003

A indica la dirección del flujo, la cara aguas arriba se denota por la letra A y la cara aguas abajo se denota por la letra B.

Espesores  $E$  y  $e$ :

El espesor  $e$  de la paca orificio debe ser entre  $0.005 * D$  y  $0.02 * D$ .

$$0.005 * D \leq e \leq 0.02 * D$$

El grosor  $E$  deberá estar entre  $e$  y  $0.05D$

$$e \leq E \leq 0.05 * D$$

Angulo  $\alpha$ :

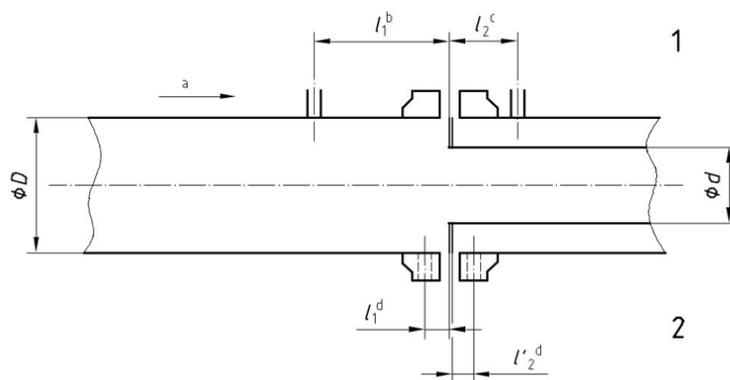
Si el espesor de  $E$  es mayor que el espesor de  $e$  la placa se biselara en el lado de aguas abajo. El ángulo de bisel  $\alpha$  será de  $45^\circ \pm 15^\circ$

Diámetro del orificio  $d$ :

El diámetro  $d$  en cualquier caso debe ser mayor o igual a 12.5mm.

La relación de diámetros  $\beta = d/D$  debe ser mayor o igual a 0.1 y menor o igual a 0.75

Tomas de presión: en la figura 70 se muestra las medidas estándar para realizar la toma de presión sobre la tubería.



**Figura 70. Separación para tomas de presión.**

Fuente: norma ISO 5167-2:2003.

Placas de orificio con tomas de brida: El espacio  $l_1$  es nominalmente 25.4mm y se mide a partir de la cara aguas arriba, el espacio  $l_2$  es nominalmente 25.4mm medido desde la cara aguas abajo de la placa.

El diámetro de la toma de presión será inferior a 0.13D y menor a 13mm, estas deben ser circulares y cilíndricas con una longitud de al menos 2.5 veces el diámetro de la toma, medido desde la pared interna de la tubería. Estos valores pueden tomar los siguientes rangos sin alterar el coeficiente de descarga:

25.4mm  $\pm$  0.5mm cuando  $\beta > 0.6$  y  $D < 150$ mm

25.4mm  $\pm$  1mm en todos los otros casos.

#### **Coeficientes:**

**Coeficiente de descarga (C):** Viene dado por la siguiente ecuación.

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 + 0.000521 \left( \frac{10^6 \beta}{ReD} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left( \frac{10^6}{ReD} \right)^{0.3} \\ + (0.043 + 0.08e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \left( \frac{\beta^4}{1 - B^4} \right) - 0.03(M'_2 \\ - 0.8M'_2{}^{1.1})\beta^{1.3}$$

Si  $D < 71.12$ mm se le agrega el siguiente termino a la ecuación

$$+0.011 * (0.75 - \beta) * \left( 2.8 - \frac{D}{25.4} \right)$$

Donde:

$$B = \frac{d}{D}$$

$$L_1 = \frac{l_1}{D}$$

$$L_2 = \frac{L_2}{D}$$

$$M'_2 = 2 * \frac{L_2}{1 - \beta}$$

$$A = \left( \frac{19000 * \beta}{Re * D} \right)^{0.8}$$

Factor de expansión ( $\epsilon$ ):

Se calcula de la siguiente formula:

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0,256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right)$$

$$k = \left( \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)}}{C\beta^2} - 1 \right)^2$$

Esta ecuación es aplicable si  $\frac{p_2}{p_1} \geq 0.75$

Para la instalación de las placas orificio se requiere una distancia de tramos rectos de tubería antes y después del elemento la cual es de 10D para cuando haya un codo de 90° o una T.

### **Diseño**

La placa orificio se diseñó para medir el caudal de vapor que circula por el intercambiador el cual lo hace por una tubería metálica que tiene un diámetro interno de 41mm.

$$D = 41\text{mm}$$

Cálculo de E y e:

$$0.005 * D \leq e \leq 0.02 * D$$

$$e \leq E \leq 0.05 * D$$

Para  $e$  se seleccionó el valor máximo permitido debido a que si se toma un valor menor el grosor de la placa es mínimo lo cual dificulta su fabricación.

$$e = 0.02 * D = 0.82mm = 0.8mm$$

Con lo que el valor final de  $e$  fue:

$$e = \frac{0.8}{41} = 0.0195 * D$$

Igualmente, para el valor de  $E$  se seleccionó el máximo valor permitido para darle un poco de robustez a la placa el cual fue de:

$$E = 0.05 * D = 2.05mm$$

Cálculo de  $d$ :

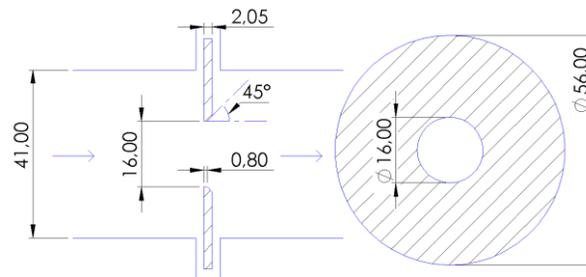
$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{donde} \quad 0.1 \leq \beta \leq 0.75$$

$$d \geq 12.5mm$$

Se seleccionó un valor de 16 mm el cual cumple con las condiciones por lo que tenemos:

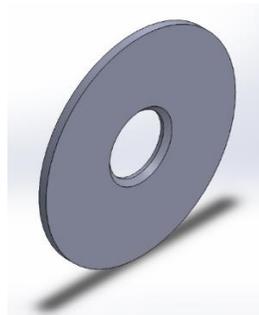
$$d = 16 \text{ mm} \quad \beta = \frac{16}{41} = 0.39$$

Dado a que  $E > e$  se seleccionó un ángulo  $\alpha$  de  $45^\circ$ , en la figura 71 se puede ver el plano de la placa.



**Figura 71. Plano placa orificio.**

Se realizo el diseño de la placa orificio en 3D con la ayuda de solidworks para poder apreciar de una mejor manera su forma (figura 72).



**Figura 72. Vista 3D placa orificio.**

Tomas de presión:

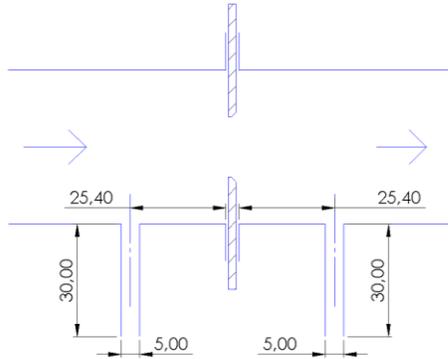
Para las tomas de brida la distancia de las caras de la placa al centro de la toma es de 25.4mm.

Diámetro de la toma  $\Phi$ :

Se selecciona un diámetro de 5 mm el cual cumple con las condiciones

$$\Phi = 5 \text{ mm cumple con } \Phi < 13\text{mm} \text{ y } \Phi < 0.13 * D$$

La longitud de esta toma es de 30mm lo cual cumple con la condición de ser al menos 2.5 veces el diámetro de la toma, en la figura 73 se muestra el plano de las tomas de presión.



**Figura 73. Plano tomas de presión.**

Se realizó el plano 3D de la toma de presión el cual es igual para ambos lados de la placa, figura 74.



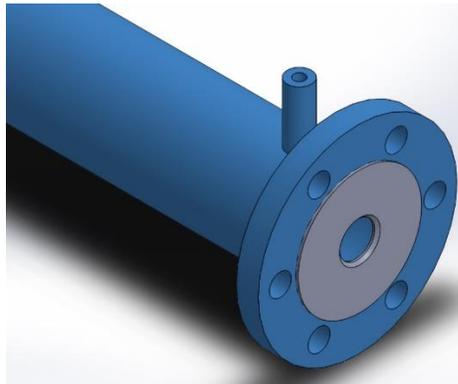
**Figura 74. Diseño 3D tomas de presión.**

Seguidamente se realizó el diseño completo en 3D de la placa orificio junto con las tomas de presión, el cual se puede observar en la figura 75.



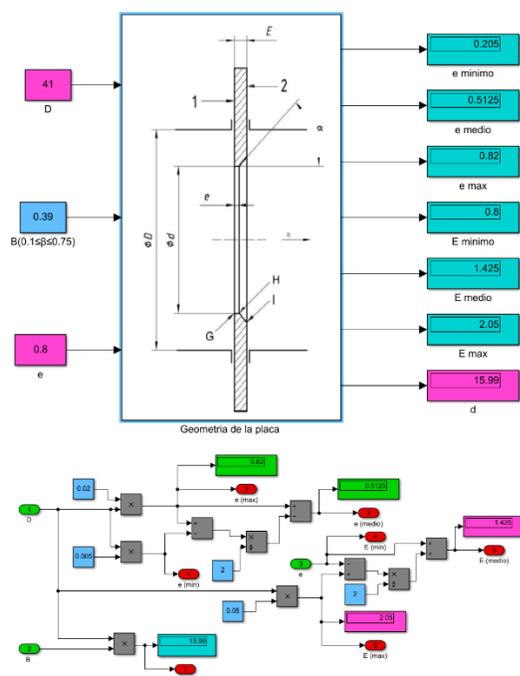
**Figura 75. Diseño completo placa orificio 3D.**

En la figura 76 podemos observar la ubicación de la placa dentro de las bridas.



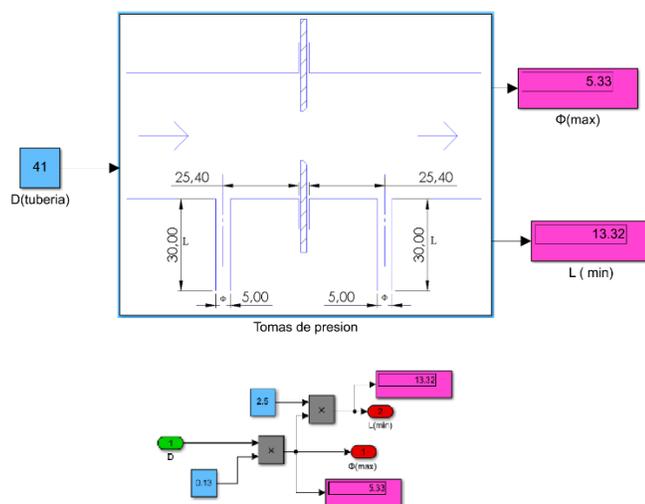
**Figura 76. Ubicación placa orificio.**

Simulación: por último, se realizó la simulación para hallar las dimensiones de la placa y las medidas de las tomas de presión, (figuras 77 y 78).



**Figura 77. Cálculos dimensiones de la placa**

La simulación de la geometría de la placa se ingresa el valor del diámetro de la tubería y la relación de diámetros  $B$ , esta me entrega el rango de valores que pueden tomar las dimensiones  $e$  y  $E$  para finalmente calcular el diámetro del orificio  $d$ .



**Figura 78. Cálculos tomas de presión**

Se ingresa el diámetro de la tubería y la simulación me indica el diámetro máximo de la toma y el valor mínimo de la longitud de esta.

**Medidores de presión:** para poder realizar la lectura del caudal por el método de la placa orificio se requiere medir la diferencia de presión en los dos lados de la placa, en las tomas de presión correspondientes. Esta medida puede realizarse de manera independiente en cada toma con un sensor de presión y realizar la operación para obtener la diferencia entre ellas, o se puede medir directamente la diferencia de presión entre las dos tomas con un sensor de presión diferencial.

Se decidió realizarlo con el sensor de presión diferencial ya que presenta un costo inferior al que tendría adquirir dos sensores de presión por separado, además al ser un solo sensor se reduce el número de pines que se requieren para la lectura de la variable desde el controlador Arduino y hace que la conexión sea menos complicada.

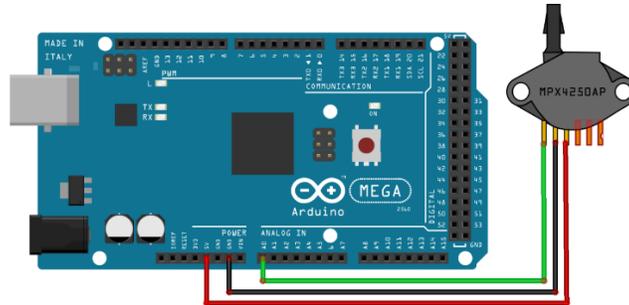
El sensor seleccionado fue el MPX55000DP (figura 79), es un sensor de presión diferencial con salida analógica entre 0.2 – 4.7v con un rango de medida de 0-500 kpa.



**Figura 79. Sensor de presión diferencial.**

Fuente: recuperado de <https://es.rs-online.com/web/p/circuitos-integrados-de-sensor-de-presion-diferencial/9227346/>

Para la conexión de este sensor con Arduino solo se requiere de un pin análogo y la alimentación, en la figura 80 se puede apreciar el diagrama de conexión.



**Figura 80. Diagrama de conexión sensor de presión diferencial.**

Finalmente, en la figura 81 se presenta el diagrama de instrumentación final del proceso.

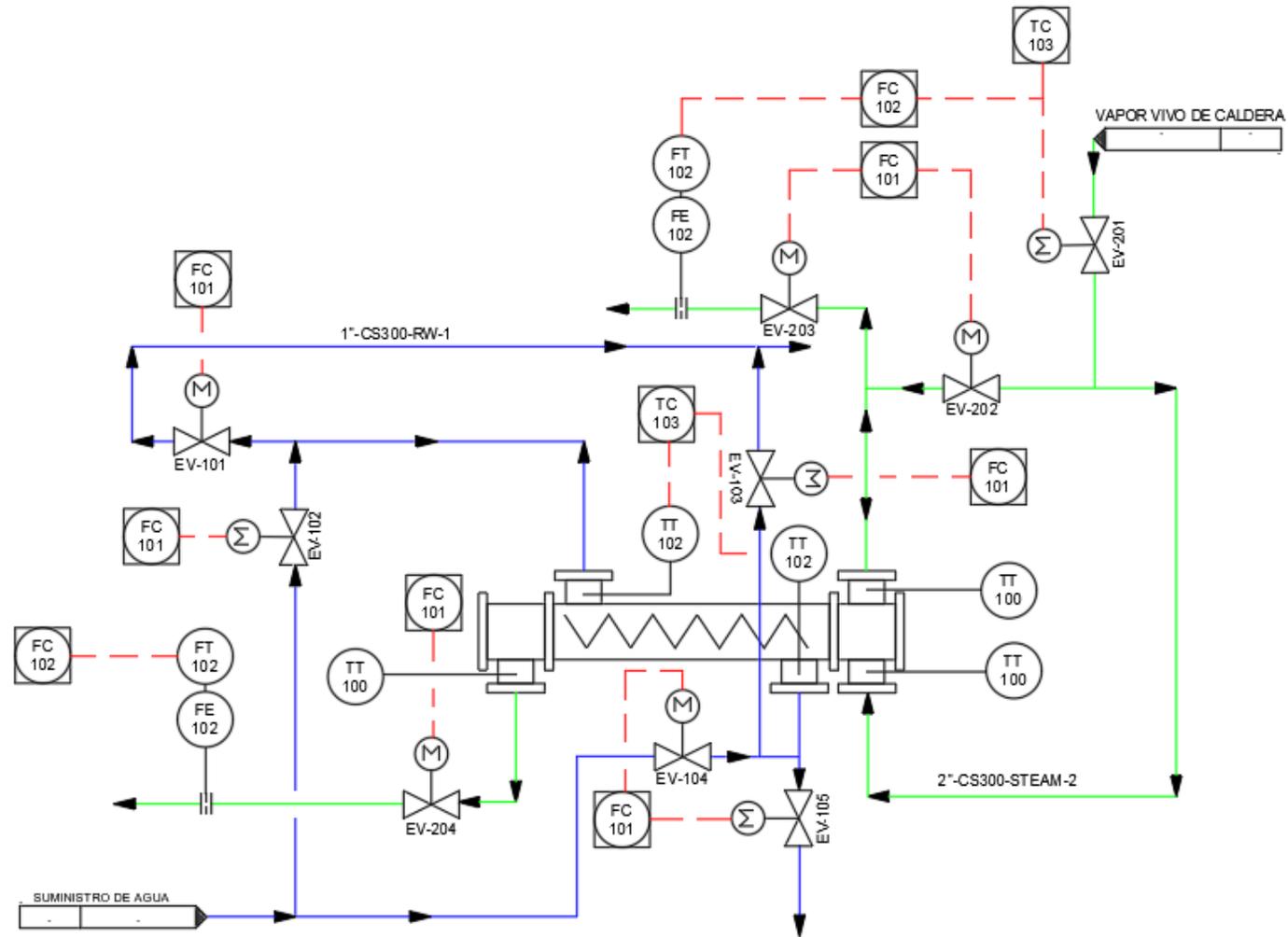


Figura 81. Diagrama de instrumentación banco de pruebas.

## 5.3 Implementación

En el contenido de este capítulo encontrara la implementación de cada uno de los sistemas que fueron diseñados con anterioridad además de la fabricación de los elementos que se requieran para ello.

### 5.3.1 Termocuplas

Para la fabricación de las termocuplas se consiguió la sonda para termocuplas tipo K que se seleccionó en el capítulo anterior, seguidamente se corta el cable en pedazos de a un metro, y se realiza la unión de los conductores en uno de sus extremos, esta unión será la que este en contando con el medio que se desea medir. Se utilizó un cable con un aislamiento de fibra de vidrio con malla metálica lo cual mantiene aislados los conductores y hace que la medida sea más exacta.

**Fabricación del termopozo:** En la fabricación del termopozo y la adecuación de este para facilitar la conexión con la toma de temperatura se deben tener en cuenta varios aspectos:

El material utilizado para la funda fue el acero inoxidable, debido a que el termopozo debe ser un material altamente resistente a la corrosión, resistente a las altas temperaturas, alta fuerza y dureza.

Se debe seleccionar el diámetro de la funda protectora de tal manera que esta pueda entrar fácilmente dentro de la toma de temperatura sin rozar las paredes de esta y al mismo tiempo que el cable de la termocupla pueda entrar con facilidad dentro de la funda. El valor seleccionado fue de 1/4 de pulgada.

El espacio que queda entre la sonda de la termocupla y las paredes de la funda protectora debe ser llenado con un material que sirva como aislante y que sea resistente a altas temperaturas, esto ayuda a que la lectura sea más precisa y rápida. Para esto se ha seleccionado el mortero refractario, este es una mezcla de materiales refractarios molidos, resistente al choque térmico y capaz de resistir temperaturas de hasta 1500°C, es estable a altas temperaturas y tiene una baja absorción de agua.

Para la instalación de la termocupla en la toma se requiere de un racor y un material adhesivo para fijar la funda protectora a él.

En la tabla 12 se muestra la lista de materiales que se requieren para la fabricación.

**Tabla 12. Materiales para fabricar las termocuplas**

MATERIAL	IMAGEN	FUNCIÓN
Sonda de termocupla tipo K		La sonda de termocupla es el elemento sensor, por lo tanto, es el encargado de tomar la lectura de la temperatura en el punto.
Varilla de acero inoxidable 1/4		Cubierta termopozo.
racor		Fijar termopozo con la toma de temperatura.

		
Cemento mortero refractario.		Aislante térmico para rellenar el termopozo.
Masilla epóxica		Unir el racor con la cubierta del termopozo, unir el cable termocupla con el racor.

### Proceso de fabricación:

1. Se cortan las piezas necesarias de la varilla de acero inoxidable, las que seguidamente son perforadas para hacer la cubierta del termopozo, (figura 82).



**Figura 82. Funda termopozo**

El largor de la cubierta es de 8.5 cm, se hace un poco más largo que la toma de temperatura para que la punta del termopozo quede en contacto directo con el flujo de trabajo al cual se le tomara la medición de la temperatura.

La perforación de las varillas se debe hacer de tal forma que las paredes de la cubierta queden lo más delgadas posibles para que el proceso de lectura de la temperatura sea más rápido, pero con la suficiente dureza, en este caso para la varilla de 1/4 se utilizó una broca de 13/64.

2. Se corta el cable de la termocupla en 5 piezas de un metro, esta es la distancia aproximada desde la toma de temperatura hasta el controlador.
3. Se realiza la unión de los dos conductores con soldadura de punto en uno de los extremos de cada cable. Ver figura 83.



**Figura 83. Unión de conductores termocupla**

4. Haciendo uso de la masilla epóxica se fija el racor a la cubierta del termopozo, figura 84.



**Figura 84. Unión racor-cubierta**

Esta unión debe ser concéntrica para que al momento de hacer la instalación dentro de la toma de temperatura entre totalmente libre y no choque con las paredes de la toma.

5. Se introduce el cable en la termocupla en la cubierta del termopozo dejando un leve espacio entre la punta de la cubierta y la unión.
6. Con la ayuda de la masilla epóxica se fija la termocupla en el termopozo para que esta no pueda ser removida fácilmente, figura (85).



**Figura 85. Unión termocupla-termopozo**

7. Se prepara una mezcla de cemento refractario y agua, la cual es introducida dentro de la cubierta del termopozo para llenar los espacios que quedan entre el cable y las paredes de la cubierta. El cemento debe ser filtrado con anterioridad para que la mezcla quede lo más delgada posible y sea fácil introducirla dentro de la cubierta. Finalmente se debe dejar un

espacio libre de cemento junto a la unión en donde se almacene el calor y para que esta quede expuesta directamente al calor, (figura 86).



**Figura 86. Llenado del termopozo con mortero refractario**

8. Seguidamente la termocupla debe ser sometida a un proceso de secado, para que la mezcla quede totalmente seca.
9. Por último, el orificio en el extremo debe ser sellado de tal manera que la unión no quede haciendo contacto con ninguna de las paredes. Para esto se realizaron unos pequeños tapones los cuales son colocados a presión, (figura 87).



**Figura 87. Tapón termopozo**

Una vez colocado este tapón la termocupla está lista para ser usada. Figuras (88-89).



**Figura 88. Instalación tapón termopozo**



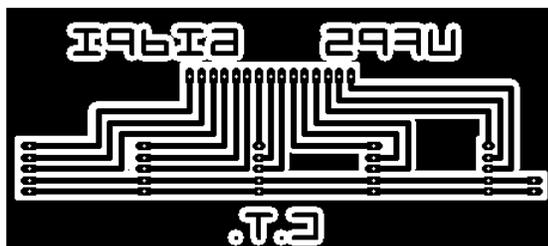
**Figura 89. Termocuplas finalizadas**

### 5.3.2 Módulos

En el capítulo anterior se pudieron apreciar los diagramas de conexiones de los implementos, de los cuales en algunos casos se requieren hacer estas conexiones en más de una ocasión ya que se necesitan cierto número de estos implementos. Como lo es el caso de las termocuplas las cuales deben ser 5 con su módulo max6675, los motores paso a paso que son 9 junto con su módulo DRV8825 y los displays 7 segmentos que serán 6 con su módulo TM1637. Para facilitar la conexión de todos estos implementos se realizó un módulo tipo PCB para cada tipo y así permitir que la conexión se haga de una manera más ordenada, además de que también facilitaría la identificación de fallas o desconexiones en caso de que las hubiera.

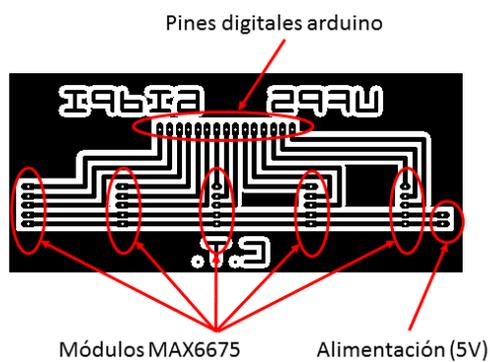
**Módulo para termocuplas:** Como ya se ha mencionado se requieren de 5 termocuplas en total para medir las temperaturas necesarias, como se pudo ver en el diagrama de conexión cada driver MAX6675 necesita de 3 pines digitales para su control y dos pines de alimentación.

En la figura 90 se puede ver el circuito PCB para la conexión de los drivers MAX6675 el cual fue realizado en el software PCB-wizard.



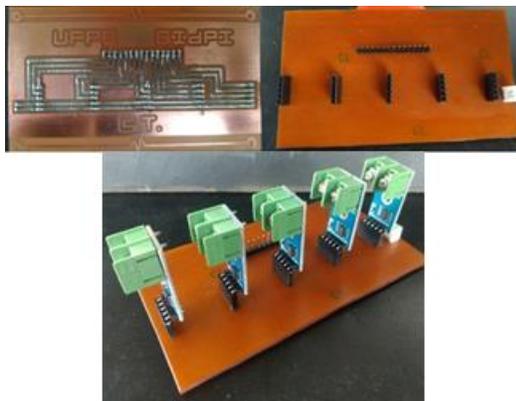
**Figura 90. Circuito pcb termocuplas**

En la figura 91 se indica como debe ser la conexión de este módulo.



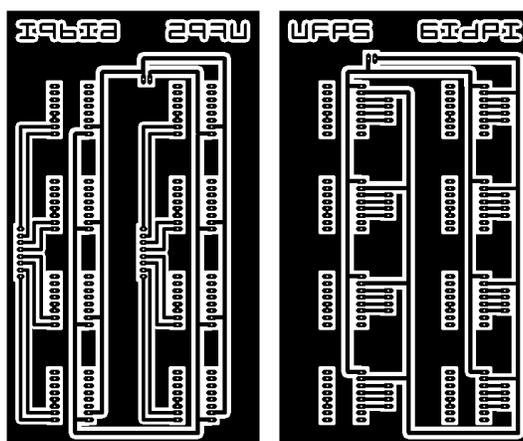
**Figura 91. Conexión modulo termocuplas**

Seguidamente se imprimió y se quemó en una baqueta de fibra de vidrio, donde luego se soldaron los conectores necesarios para los pines del Arduino y los módulos, (figura 92).



**Figura 92. Módulo para conexión de termocupla**

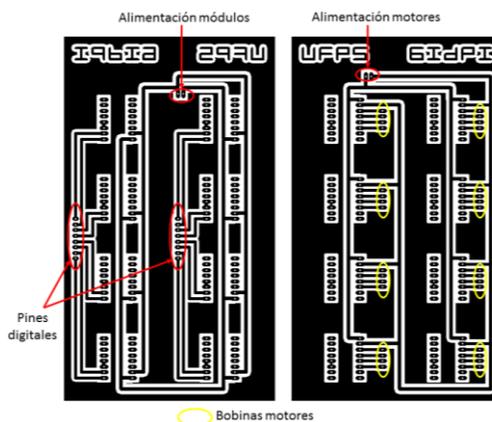
**Módulo para motores paso a paso:** Para la automatización de las válvulas se requiere de un motor paso a paso en cada una de ellas, además de que cada motor debe tener un driver DRV8825 para su control. Como se pudo apreciar en el diagrama de conexiones para cada módulo se requieren 2 pines para su control, 2 pines de alimentación del módulo, 2 pines para el voltaje de los motores y 4 pines para la conexión del motor. A continuación, se puede ver el circuito PCB en PCB-wizard, (figura 93).



**Figura 93. Circuito pcb módulo motores paso a paso**

Debido a la gran cantidad de conexiones que requiere el módulo no fue posible realizarlas todas en un solo circuito por lo que se hizo necesario realizar una PCB doble cara, por lo tanto,

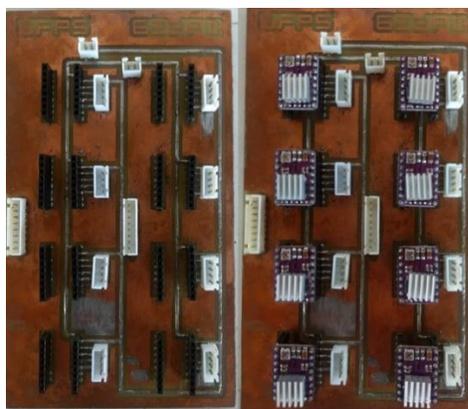
para su implementación se necesitara una baqueta de fibra de vidrio doble-face. A continuación, en la figura 94 se muestra el diagrama de conexiones del módulo.



**Figura 94. Diagrama conexiones modulo motores paso a paso**

El voltaje de alimentación de los motores en este caso es de 24V. el módulo se realizó para las válvulas EV101, EV102, EV103, EV104, EV105, EV202, V203, EV204 las cuales tendrán un control on/off.

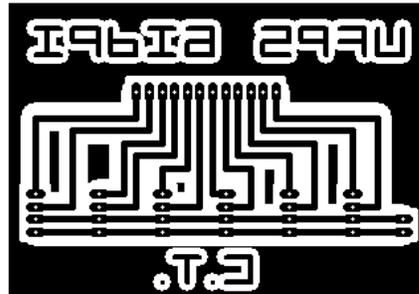
Finalmente se quemó la PCB y se soldaron los conectores necesarios, (figura 95).



**Figura 95. Módulo para motores paso a paso.**

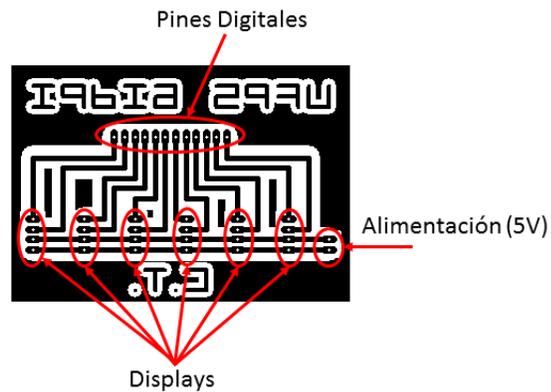
**Módulo displays:** Para la implementación de la HMI se requieren de 6 displays 7 segmentos para indicar las variables necesarias, como se mostró en el capítulo anterior para la

conexión de cada uno de estos displays se necesitan 4 pines, dos para el control y dos para su alimentación. A continuación, en la figura 96 se puede ver el circuito PCB para la conexión de los 6 módulos.



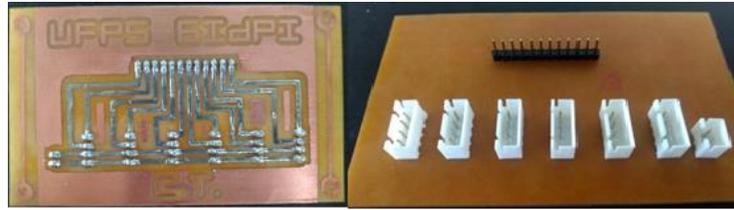
**Figura 96. Circuito módulo displays**

La conexión del módulo se realiza como lo indica la figura 97.



**Figura 97. Conexión modulo displays**

Finalmente se quemó la baqueta y se soldaron los conectores necesarios para las conexiones (figura 98).



**Figura 98. Modulo displays**

Adicionalmente se realizo un pequeño modulo para distribuir el voltaje de alimentacion a todos los componentes.

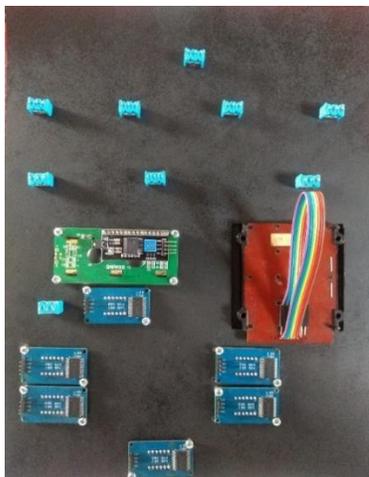
### **5.3.3 Parte de control**

En la parte de control se encuentra la HMI con todos los elementos que la componen, el módulo de comunicación inalámbrica, y el controlador encargado de procesar la información en esta parte del proceso.

Primeramente, se fabricó una caja metálica sobre la cual serán colocados todos los elementos que componen la interfaz, dentro de ella está el controlador Arduino, el módulo de transmisión radiofrecuencia y la electrónica necesaria para realizar la correcta conexión de cada uno de los implementos.

La caja se fabricó en acero galvanizado con unas medidas de 25cm de ancho x 32 cm de alto y 10 cm de profundidad, este espacio es suficiente para posicionar todos los componentes.

En la tapa delantera se realizan las perforaciones necesarias y se instalan todos los componentes de la HMI (figura 99).



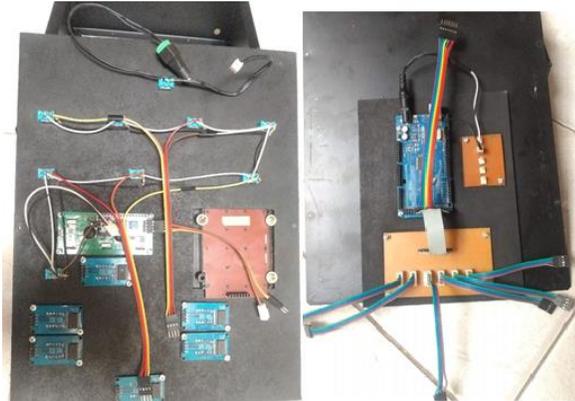
**Figura 99. Componentes HMI parte trasera**



**Figura 100. Componentes HMI parte delantera**

Como se puede observar en la figura 100 se encuentran los interruptores necesarios para las selecciones de modo de trabajo y control, los displays para las visualizaciones de las variables, la pantalla para las instrucciones y el teclado para ingresar los valores del “setpoint”, se han agregado 3 interruptores, uno para confirmar la selección de la configuración de flujo, uno para confirmar el tipo de control y otro para dar inicio al proceso.

Seguidamente se realizó la conexión de cada uno de estos elementos a la placa Arduino siguiendo los diagramas de conexiones (figura 101).



**Figura 101. Conexión parte de control**

Para la alimentación del módulo se utiliza una fuente de 5v ya que todos estos elementos incluido el Arduino trabajan con este valor, como cada elemento esta energizado independiente de Arduino es decir no se utilizan las salidas de 5v del Arduino, se deben hacer una conexión tierra común entre el negativo de Arduino y el negativo de la fuente de alimentación, si no se hace esto nada funcionara.

**Funcionamiento parte de control.** Una vez se ha realizado la conexión de cada uno de los elementos se programa el controlador para cumplir con el funcionamiento que se le quiera dar al proceso, en la figura 102 se puede observar el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.



**Figura 102. Diagrama de funcionamiento parte de control**

- Se debe energizar el sistema pasando el interruptor de encendido al estado ON.
- Se selecciona la configuración de flujo, y el control que se desea trabajar.
- Se accionan los interruptores para confirmar la selección.
- Se ingresa el “set-point”.
- Se confirma el “set-point”.

Finalmente se acciona el interruptor de inicio, en este momento se deben enviar la información a la parte de potencia del proceso, y empezar a recibir la información proveniente de ella, mostrando las variables en los displays.

En la selección de la configuración de flujo y el tipo de control se deberá seleccionar una sola opción de lo contrario indicará error.

Para entender de una mejor manera el funcionamiento del proceso se realizó una tabla de verdad (tabla 13) de las entradas de selección de modo de trabajo y control.

**Tabla 13. Tabla de verdad selección de flujo y control**

P1	P2	P3	P5	P6	OUT	P1	P2	P3	P5	P6	OUT
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

El sistema solo saldrá del estado de selección si se encuentra en uno de las 6 opciones resaltadas, siempre y cuando los interruptores de confirmar se hayan activado, en cualquiera de las otras opciones marcará error en la parte de la pantalla que corresponda, en donde para el tipo de control será la línea superior de la pantalla y para el tipo de control la parte inferior.

Seguidamente se debe ingresar el valor del “set-point” con el teclado, la tecla \* funciona como borrador y la tecla # confirmará el “set-point”, en este momento el sistema estará listo para ponerse en marcha presionando el botón de inicio.

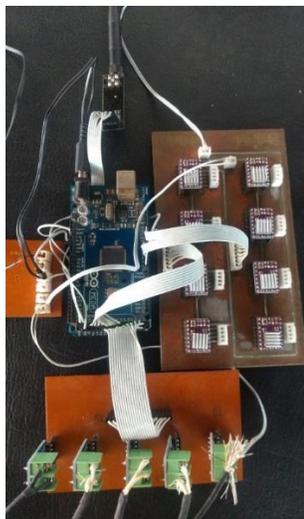
Durante todo el proceso se deben dar las instrucciones a seguir y se deben indicar los errores cometidos en la pantalla de instrucciones. Una vez el proceso esté en funcionamiento si se desea cambiar de configuración de flujo o de tipo de control primero se deberá detener el proceso desactivando el botón de inicio y los botones de confirmar.

### 5.3.4 Parte de potencia

Para la implementación de la parte de potencia se presentó la limitación de que no se pudo contar con el laboratorio en el cual se encuentra el banco de pruebas del intercambiador de calor sobre el que se instalarían los instrumentos, esto fue debido al cierre de la universidad Francisco de Paula Santander por la situación que se vive a nivel mundial por la pandemia del virus COVID-19, por lo tanto, los sistemas fueron implementados sin tener conexión al banco de pruebas.

A pesar de no contar con el banco de pruebas se implementó la parte de potencia para verificar la funcionalidad de cada sistema. La parte de potencia se compone de el controlador Arduino, el módulo de radiofrecuencia, el módulo para las termocuplas junto con las termocuplas y el módulo para los drivers de los motores paso a paso para el control de las válvulas, los motores paso a paso que funcionan como actuadores de las válvulas no se conectan ya que estos no pudieron ser instalados.

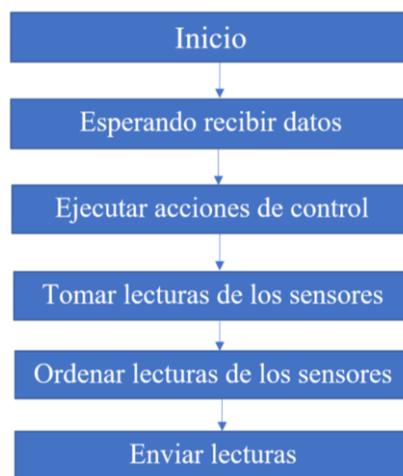
Se realiza la conexión de los elementos siguiendo los diagramas de conexiones de cada uno de los elementos (figura 103). Al igual que en la parte de potencia la polarización de los elementos se hace con una fuente de 5v y se realiza la conexión de tierra común entre el Arduino y la fuente.



**Figura 103. Conexión parte de potencia**

Las termocuplas se conectan con el fin de verificar su funcionamiento y el de la comunicación enviada de las lecturas de estas a la parte de control.

**Funcionamiento parte de potencia:** una vez conectados todos los elementos se programa el controlador el cual tiene el siguiente funcionamiento (figura 104).



**Figura 104. Diagrama de funcionamiento parte de potencia**

Una vez energizado, el sistema entra en un tiempo de espera, mientras recibe las señales de la parte de control del proceso, al momento de recibir las señales dependiendo de la

información que reciba, ejecuta las acciones de control correspondientes al estado en el que se encuentre, en este momento también empieza a tomar las lecturas de las variables, las ordena dependiendo del estado y las envía hacia la parte de control.

### 5.3.5 Programación

**Comunicación bidireccional:** La comunicación bidireccional se realizó con el módulo de radiofrecuencia nrf 24l01 (figura 105) , El cual hace uso de las librerías nrf24L01, RF24, spi, Seguidamente se definen los pines para su control, también se deben declarar los canales a utilizar para la comunicación ya que el módulo posee 6 canales y en este caso solo se utilizaron 2, se definen las variables a enviar y las variables a recibir, se debe inicializar el módulo y abrir los puertos para la escritura y la lectura de datos.

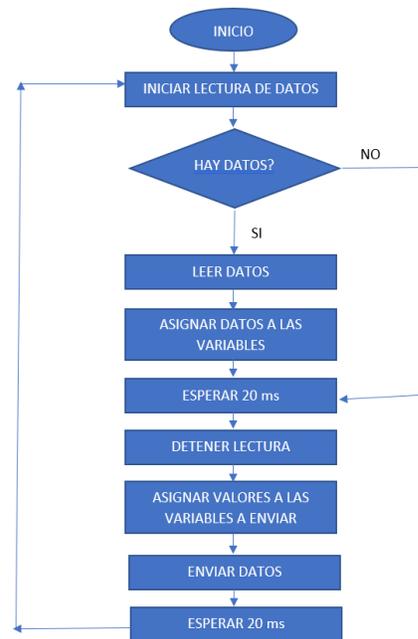
```

#include <nRF24L01.h>           //incluyen las librerías
#include <RF24.h>
#include <RF24_config.h>
#include <SPI.h>
const int pinCE = 2; // definen los pines para el control
const int pinCSN = 3;
RF24 radio(pinCE, pinCSN);
const uint64_t pipe[2]= {0xB3B4B5B6F1LL, 0xB3B4B5B6CDLL}; //declara los canales a utilizar
float data[2]; // variables a enviar
float data2[6]; // variables a leer
void setup() {
  radio.begin(); //inicializa el modulo
  radio.openWritingPipe(pipe[0]); // se abre el puerto de escritura
  radio.openReadingPipe(1,pipe[1]); // se abre el puerto de lectura
}
void loop(){
  radio.startListening(); //inicia la lectura
  while(radio.available()){ // pregunta si se estan recibiendo datos
    radio.read(data, sizeof data); //lee los datos recibidos
    tea= data[0]; //asigna cada dato a la variable correspondiente
    tsa= data[1];
    tev= data[2];
    tsv= data[3];
    fv= data[4];
    delay(20); //espera 20ms
    radio.stopListening(); // detiene la lectura
    data[0]= memoria; // se asignan las variavles a los datos a enviar
    data[1]=sp;
    radio.write(data, sizeof data); //envia los datos
    delay(20); //espera 20 ms
  }
}

```

**Figura 105. Programación comunicación parte 1**

El proceso de envío de datos se hace de acuerdo al diagrama de la figura 106.



**Figura 106. Algoritmo intercambio de información**

```

#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <RF24_config.h>
#include <SPI.h>
const int pinCE = 2;
const int pinCSN = 3;
RF24 radio(pinCE, pinCSN);
const uint64_t pipe[2]= {0xB3B4B5B6F1LL, 0xB3B4B5B6CDLL};
float data[2];
float data2[6];
void setup(void)
{
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(pipe[1]);
  radio.openReadingPipe(1,pipe[0]);
}
radio.startListening();
while(radio.available()){
  radio.read(data, sizeof data);
  estado =(data[0]);
  sp = data[1];
  delay(20);
  radio.stopListening();
  data2[0]=t1;
  data2[1]=t2;
  data2[2]=t3;
  data2[3]=t4;
  data2[4]=lxml;
  radio.write(data2, sizeof data2);
  delay(20);
}
  
```

**Figura 107. Programación comunicación parte 2**

La figura 107 corresponde a la programación para el segundo modulo la cual es similar, con la diferencia de que de que se deben invertir los canales para la lectura y la escritura.

**Apertura de las válvulas:** en la figura 108 se muestra la programación para del driver para el motor paso a paso, en donde el giro del motor se realiza de acuerdo al diagrama de la figura 109.

```

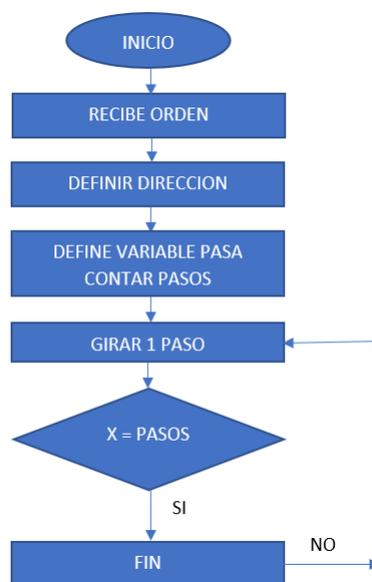
const int dirPin = 6; //definen los pines para el control
const int stepPin = 7;

const int steps = 200; // cantidad de pasos para la apertura de la valvula
int stepDelay = 250; //variable para la velocidad de giro

void setup() {
  pinMode(dirPin, OUTPUT); // definen los pines como salida
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
}
void loop() {
  //Activar una direccion y fijar la velocidad con stepDelay
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  //repite el ciclo hasta la cantidad de pasos totales
  for (int x = 0; x < steps ; x++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds(stepDelay);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(stepDelay);
  }
}

```

**Figura 108. Programación para abrir o cerrar válvulas**



**Figura 109. Algoritmo para girar motor**

**Programación termocuplas:** la programación para realizar la lectura de la temperatura con las termocuplas es bastante sencilla, gracias al módulo max6675 (figura 110).

```
#include <max6675.h> // declaramos la libreria

int ktcSO1 = 41;      //definimos los pines para el control
int ktcCS1 = 39;
int ktcCLK1 = 37;
MAX6675 ktcl(ktcCLK1, ktcCS1, ktcSO1);

void loop() {
  t1 = ktcl.readCelsius(); // preguntamos por el valor de la temperatura
}
```

**Figura 110. Programación termocuplas**

**Programación Displays:** en la figura 111 se muestra la programación que permite visualizar las variables en los displays.

```
#include "TM1637.h" //incluimos la librería
#define CLK 29 // definimos los pines donde se debe conectar
#define DIO 27
TM1637 Display1(CLK,DIO); // creamos una variable del tipo de dato TM1637
int8_t Digits[] = {0,0,0,0}; // el valor inicial a desplegar

void setup()
{
  Display1.set(7); //Ajuste brillo
  Display1.init(); //inicializar display
}

void loop(){
  tea= data2[0]; // define el valor para la variable a mostrar

  // IMPRIMIR TEMPERATURA ESTRADA AGUA
  t_in_agua[0] = int(tea/1000);
  t_in_agua[1] = int((tea%1000)/100);
  t_in_agua[2] = int((tea%100)/10);
  t_in_agua[3] = int(tea%10);}
  Display2.display(t_in_agua);
}
```

**Figura 111. Programación displays**

### 5.3.6 Control de flujo:

El sistema que más se vio limitado fue el sistema de control debido a que al no tener el banco de pruebas no se pudo instalar los actuadores sobre las válvulas y por ende no se pudo realizar el control sobre estas, además de que el sistema de medición de caudal mediante la placa orificio tampoco pudo ser instalado.

Por esta razón se decidió realizar un sistema de control de flujo sobre una tubería de agua domiciliaria, utilizando una válvula de compuerta e instalar sobre ella el actuador (motor paso a paso) para de esta manera poder verificar la funcionalidad de esta válvula y de la tecnología Arduino para modular y controlar el flujo sobre la tubería.

Se seleccionó una válvula de compuerta de  $\frac{1}{2}$  “(figura 112).



**Figura 112. Válvula de compuerta**

Fuente: recuperado de <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-536355095-tmok-12-34-1-laton-valvulas-de-compuerta-manual-g-rosca->

Seguidamente se desmontó el actuador manual y se instaló el motor paso a paso sobre ella, para este acople se soldó una base metálica sobre la válvula, atornillable con el motor paso a paso, la cual mantiene el acople fijo para que la fuerza ejercida por el motor sea transmitida directamente al embolo de la válvula y no presente pérdidas de potencia o desconexión (figura 113).

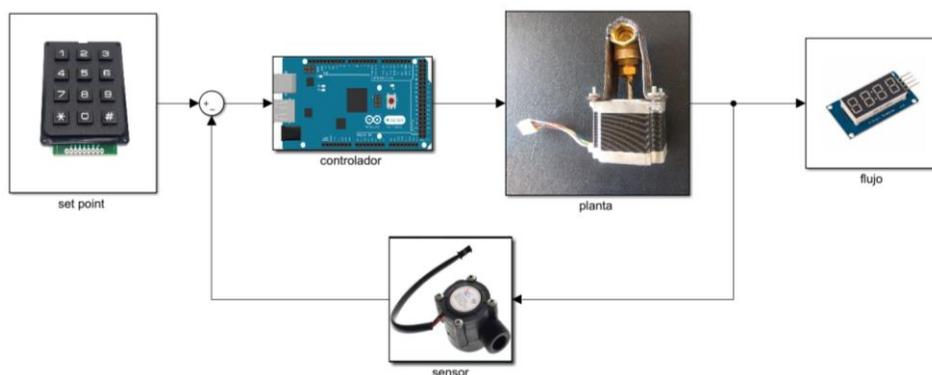


**Figura 113. Acople motor paso a paso-cuerpo de la válvula**

La relación entre el giro del motor y el giro del embolo de la válvula es de 1 a 1, en caso de tener un motor que no posea la fuerza necesaria para mover el embolo de la válvula se debe realizar un sistema de piñones que aumente la fuerza de giro hasta permitir el movimiento este movimiento.

Una vez acoplada la válvula se determina el número total de pasos que debe girar el motor para lograr una apertura del 100% de la válvula, este valor fue de 670 pasos.

Seguidamente se diseña el lazo de control del sistema (figura 114), como se puede ver además de la válvula y el controlador Arduino, se requiere de un elemento para medir la variable de salida del sistema, en este caso el caudal sobre la tubería.



**Figura 114. Diagrama del sistema de control de flujo**

Se utilizo un caudalímetro modelo YF-s201, este tiene una capacidad de 0-30 l/m y posee un sensor de efecto hall, el cual, de acuerdo a las rotaciones de un rotor de agua en su interior, entrega una cantidad de impulsos que son proporcionales a la cantidad de agua que se ha movido a través de él.



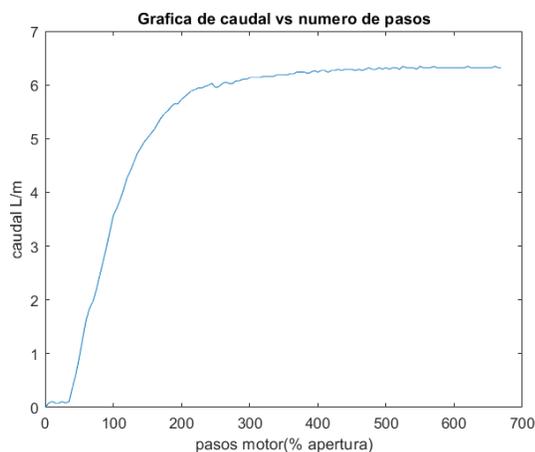
**Figura 115. Instalación válvula y caudalímetro**

Seguidamente se realizó el modelamiento de la válvula, para lo cual se implementa el sistema en malla abierta, instalando el caudalímetro y la válvula sobre la tubería, (figura 115), y conectando el actuador de la válvula y el caudalímetro al controlador Arduino. Posteriormente se realizó un proceso experimental en donde por medio de un código el controlador le ordena a la válvula cada 10 segundos abrirse un ángulo equivalente a 10 pasos del motor, al tiempo que se van tomando lecturas del caudal de agua que pasa por la tubería, los datos arrojados se pueden apreciar en la tabla 14, los cuales seguidamente fueron graficados para observar su comportamiento, (figura 116).

**Tabla 14. Datos de pasos vs flujo**

Pasos	Q	Pasos	Q	Pasos	Q
0	0	240	6	480	6.29
20	0.08	260	6.05	500	6.32
40	0.37	280	6.08	520	6.34
60	1.62	300	6.13	540	6.32
80	2.45	320	6.16	560	6.32
100	3.57	340	6.18	580	6.32

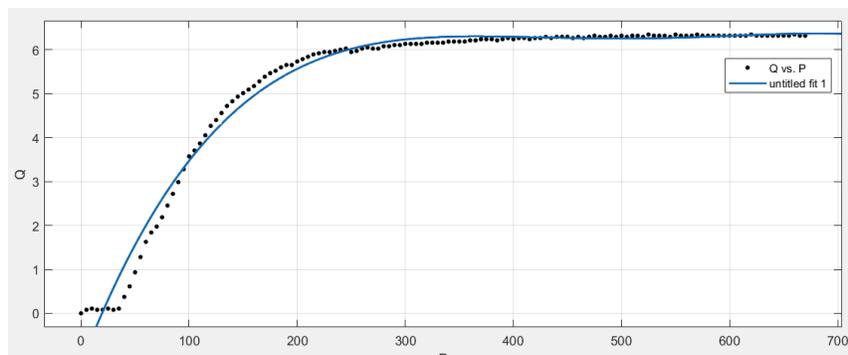
120	4.26	360	6.21	600	6.32
140	4.82	380	6.24	620	6.34
160	5.17	400	6.24	640	6.32
180	5.52	420	6.26	660	6.32
200	5.73	440	6.29	670	6.32
220	5.92	460	6.29		



**Figura 116. Grafica de pasos vs flujo**

Como se puede observar el flujo máximo sobre la tubería tiene un valor de 6.32 l/m, presentando un mayor cambio en los porcentajes bajos de apertura, con este procedimiento se verifica la funcionalidad del conjunto válvula- motor paso a paso y su capacidad para modular el flujo sobre la tubería controlando su apertura desde Arduino.

Con los datos obtenidos y la ayuda de la herramienta “curve fitting” se obtiene el modelo que mejor represente el comportamiento de las variables del sistema (figura 117).



**Figura 117. Estimación del modelo válvula**

Este corresponde a un sistema polinomial de 4 orden, en la figura 118 se pueden observar las constantes. Este proceso se realiza ya que se considera a la válvula como un sistema invariante en el tiempo, es decir el caudal depende únicamente del porcentaje de apertura y además se supone que el tiempo que tarda en abrirse es despreciable.

```

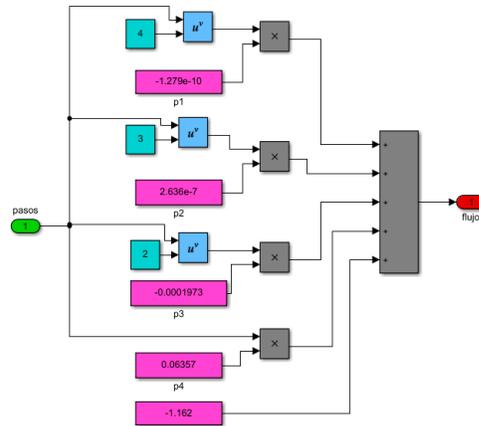
Linear model Poly4:
f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = -1.279e-10 (-1.694e-10, -8.635e-11)
p2 = 2.636e-07 (2.075e-07, 3.196e-07)
p3 = -0.0001973 (-0.0002222, -0.0001723)
p4 = 0.06357 (0.05948, 0.06766)
p5 = -1.162 (-1.358, -0.9658)

Goodness of fit:
SSE: 7.541
R-square: 0.9837
Adjusted R-square: 0.9832
RMSE: 0.2409

```

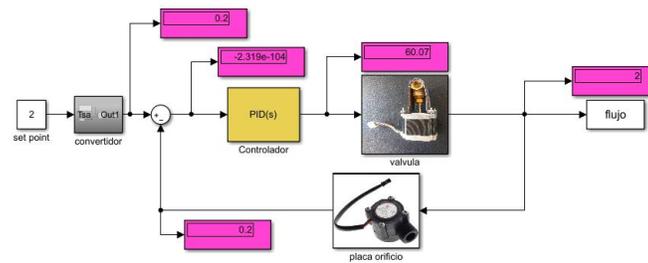
**Figura 118. Constantes modelo polinomial**

Seguidamente se realiza la simulación del modelo obtenido en Simulink, (figura 119).

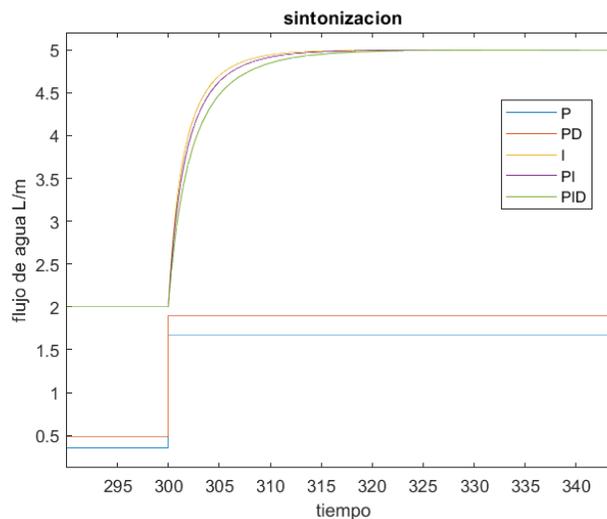


**Figura 119. Modelo válvula**

Una vez obtenido el modelo se realiza la simulación del sistema de control, (figura 120), y se realiza la sintonización por medio de la herramienta PID-tuner, figura 121.

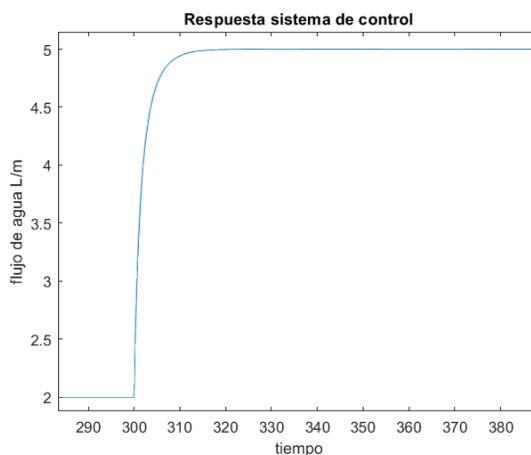


**Figura 120. Sistema de control de flujo**



**Figura 121. Sintonización control flujo**

Como se puede ver los controladores P y PD no controlan el sistema y los controladores I, PI y PID presenta una respuesta similar, la cual se debe a que en estos controladores las constantes derivativa y proporcional presentan un valor cero, por lo que finalmente el controlador seleccionado fue el integrativo con una constante de 160, (figura122).



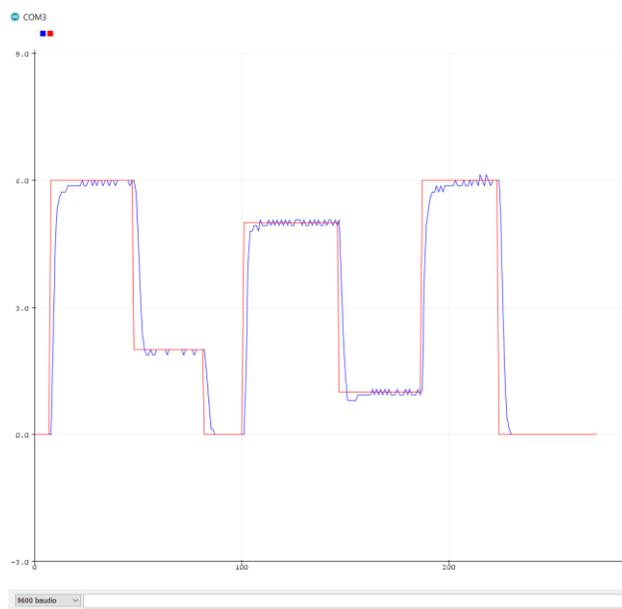
**Figura 122. Respuesta sistema de control.**

Por último, se implementa el sistema de control y se ingresan las variables en el controlador Arduino.

## 5.4 Funcionamiento

### 5.4.1 Control

Para verificar el funcionamiento del sistema de control se realizó un proceso experimental en donde se ingresaron diferentes valores de “set-point” mientras se monitoreo la señal de salida, el valor del “set-point” debe estar entre 0-6 l/m ya que este es el valor máximo de caudal sobre la tubería. En la figura 123 se puede observar la respuesta final del sistema.



**Figura 123. Respuesta sistema de control variando el valor del setpoint**

La grafica corresponde a la función serial plóter de Arduino, la línea roja representa el valor del setpoint y la línea azul el caudal sobre la tubería, como se puede ver, el sistema presenta un tiempo de estabilidad de aproximadamente 10 segundos, estos datos son tomados cada segundo debido a que para tomar la lectura del sensor de efecto hall que posee el caudalímetro se debe calcular la frecuencia, midiendo la cantidad de impulsos que este entrega

en un periodo de un segundo, lo que a la vez causa un error de 0.1 l/m en la lectura en el estado estacionario, debido a que esta forma de lectura de la variable no posee una buena precisión.

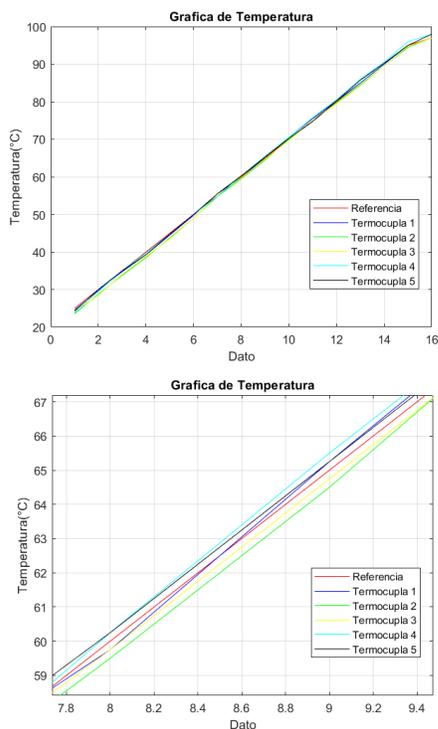
#### 5.4.2 Termocuplas

Luego de fabricar las termocuplas, se realizó un proceso experimental con ellas para verificar la confiabilidad de sus lecturas, para lo que se requiere de un elemento que sea tomado como referencia.

El elemento tomado como referencia fue una termocupla tipo k la cual hace parte de un sistema de medida de temperatura de un multímetro, el proceso experimental consistió en medir la temperatura del agua desde una temperatura de 25°C hasta el punto de ebullición, mientras se tomaron datos de temperatura con la termocupla de referencia y las 5 termocuplas fabricadas, en la tabla 15 se pueden apreciar estos datos, los cuales fueron tomados cada 5°C , posteriormente fueron graficados para observar su comportamiento, (figura 124).

**Tabla 15. Datos de temperatura.**

Tr	T1	T2	T3	T4	T5
25	24.5	23.5	24	23.75	24.25
30	29.75	28.75	28.5	29.5	30
35	34.75	33.75	34.3	35	35
40	39.25	38.5	38.75	39.75	39.25
45	44.5	43.75	43.5	44.75	44.75
50	49.75	49	49	50	50
55	55.5	54.75	55	54.75	55.5
60	59.75	59.5	59.75	60.25	60.25
65	65.25	64.5	64.75	65.5	65.25
70	70.5	70	69.75	70.5	70.25
75	75.5	74.75	75	75.75	74.75
80	80.25	79.75	79.5	80.5	80.25
85	85	84.5	84.25	86	85.75
90	90	89.5	89.5	90.5	90.25
95	95	94.5	94.75	96	95
97	98	97	97	98	98



**Figura 124. Datos de temperatura termocuplas**

Como se puede ver en los datos de la tabla 15 y en la figura 117 las medidas tomadas por las 5 termocuplas se mantienen cerca del valor entregado por el sensor de referencia y tienen entre ellas una variación de aproximadamente 1 grado, lo cual es normal puesto que en general las termocuplas poseen un error que oscila entre los 0.5 y 1 grado centígrado, por lo tanto, se puede decir que las lecturas que estas arrojan son confiables.

### 5.4.3 Comunicación

Después de haber realizado todas las conexiones correspondientes en la parte de control y la parte de potencia del proceso y habiendo cargado la programación en cada uno de los controladores se verifica el correcto funcionamiento del sistema de comunicación.





**Figura 126. HMI**

**Tabla 16. Presupuesto**

ELEMENTO	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
MOTOR	10000	9	90000
MODULO DRV	8000	9	72000
TERMOCUPLAS	20000	5	100000
MODULO MAX	12000	5	60000
DISPLAY	5000	7	35000
ARDUINO	60000	2	120000
NRF24L01	15000	2	30000
HMI	50000	1	50000
MPX55000	60000	1	60000
TOTAL			617000

## 6. Conclusiones

El cierre de la Universidad debido a la pandemia afectó el normal desarrollo de la parte final de la implementación del proyecto, más sin embargo se buscaron alternativas que permitieron realizar las tareas necesarias.

La realización de este proyecto permitió poner en práctica una gran cantidad de conceptos adquiridos durante el proceso de formación como ingeniero electromecánico, además de que el trabajo realizado podría servir para el aprendizaje de los estudiantes asociados a los grupos de investigación GIDPI y FLUTER como a los estudiantes de ingeniería electromecánica.

Por medio del modelo matemático, se pudo observar el comportamiento de las variables del proceso, en donde con las simulaciones se determinó la relación entre ellas, lo que permitió seleccionar de una manera adecuada las variables necesarias para realizar posteriormente el sistema de control.

En el diseño del sistema de control se seleccionó la estrategia más adecuada de controladores PID para controlar el sistema, la cual fue el controlador PI, además se pudo observar que la ganancia derivativa no afecta el comportamiento del sistema, ya que, durante la sintonización en todos los casos, el valor arrojado por la herramienta pid-tuner para esta constante, tenía un valor nulo.

En los diseños de los sistemas y la selección de los elementos, para cumplir con cada una de las tareas requeridas, se encontró una gran variedad de estos, lo que es una evidencia del gran avance de la tecnología Arduino, presentando diversas alternativas para desarrollar este tipo de proyectos, esto se debe a que existe una gran cantidad de fabricantes que incluyen en sus inventarios la fabricación de elementos compatibles con esta tecnología. Además, la

implementación de los sistemas propuestos no presenta demasiada dificultad debido a que las conexiones de los elementos seleccionados son bastante sencillas, la mayor dificultad se presenta al momento de programar el controlador para que cumpla con el funcionamiento requerido.

En general la tecnología Arduino cumple con las expectativas esperadas, a pesar de las limitaciones que se presentaron para la implementación, en los diseños se pudo apreciar su capacidad para llevar a cabo todas las tareas requeridas para el desarrollo del proyecto. En la implementación y las pruebas realizadas, se pudo verificar el funcionamiento de tareas esenciales como la comunicación inalámbrica bidireccional entre las tarjetas Arduino, la capacidad de tomar lecturas de las variables del proceso a través de sensores de temperatura y caudal, ejecutar acciones de control en lazo cerrado, controlar elementos como electroválvulas y permitir una interacción entre el operario y la máquina a través de una HMI. Por lo tanto, la tecnología Arduino puede ser una buena opción para desarrollar sistemas de control y automatización de procesos industriales cuando no se requiera de tecnologías más robustas.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda la recuperación y automatización de todo el laboratorio de plantas térmicas ya que sería de gran apoyo para el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería electromecánica, al brindarles un espacio donde se puedan realizar prácticas de laboratorio e investigaciones en áreas como comunicaciones industriales, control, instrumentación y automatización.

Al momento de implementar cualquier sistema usando tecnología Arduino en donde se requiera la conexión de elementos que necesiten una alimentación, se recomienda realizar la alimentación de estos de manera independiente de Arduino, utilizando para ello una fuente externa, esto debido a que la corriente que pueden proporcionar los pines del Arduino es bastante limitada y, además, puede presentar problemas de saturación y calentamiento.

Al hacer uso de elementos sensores o actuadores se recomienda que estos sean análogos, debido a que este tipo de elementos se pueden controlar de una manera más sencilla desde un controlador como Arduino haciendo uso de sus entradas y salidas análogas, y así evitar problemas como el que se presentó en la realización del control de flujo debido al error en la lectura del caudalímetro utilizado.

Al momento de programar el controlador Arduino se recomienda descargar las librerías necesarias para el control de los elementos directamente desde el gestor de librerías de Arduino o en páginas confiables, ya que muchas veces, estas presentan errores que pueden afectar el funcionamiento de los elementos, además se recomienda descargar siempre la última actualización del software directamente desde la página oficial de Arduino.

Dentro del código se recomienda no hacer uso del comando “delay” a no ser que sea estrictamente necesario, ya que este representa un retardo en todas las acciones del controlador y puede afectar el correcto funcionamiento de los sistemas.

## 8. Referencias

(s.f.).

Carrillo Paz, A. J. (2011). *Sistemas Automaticos de control*. Santa Rita: UNERMB.

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. MCGRAW-HILL.

Cengel, Y., & Michael, B. (2012). *termodinamica*. Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Comite español de automatica. (2009). *Libro blanco de control automatico*. españa : Grafo, S.A.

Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y Actuadores*. MEXICO.

Corporation, National Instruments. (2019). *Que es adquisicion de datos*. Obtenido de <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

Garrido Pedraza, J. (s.f.). *Fundamentos de arduino*.

Ing. Lopez Salazar, B. (2016). *procesos industriales*. Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/procesos-industriales/>

Ogata, K. (2010). *Ingenieria de Control Moderna*. españa: pearson.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1: Guías para utilizar el prototipo realizado.

FACULTAD DE INGENIERÍAS – INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

GUIA 1: LECTURA DE TERMOCUPLAS EN ARDUINO CON DRIVER MAX 6675

#### OBJETIVO:

Realizar medición de temperatura en diferentes puntos con Arduino y modulo MAX6675.

#### MATERIALES:

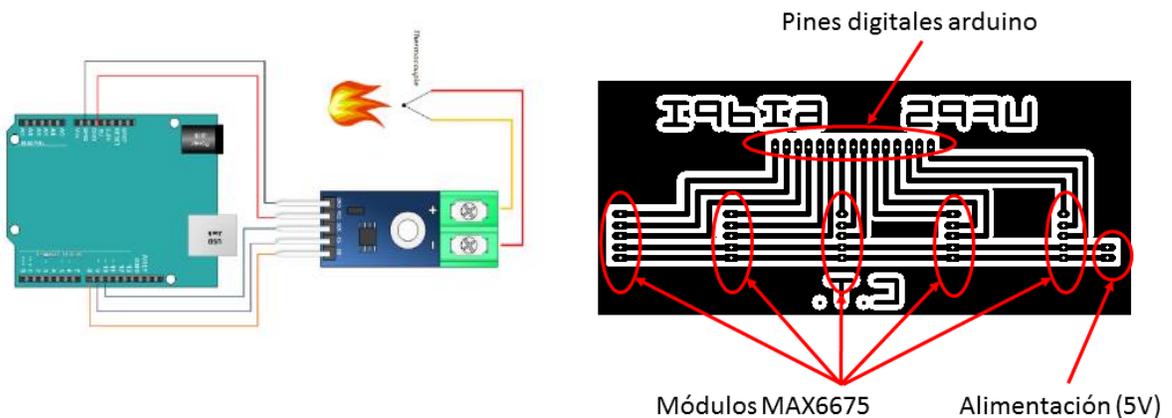
5 termocuplas

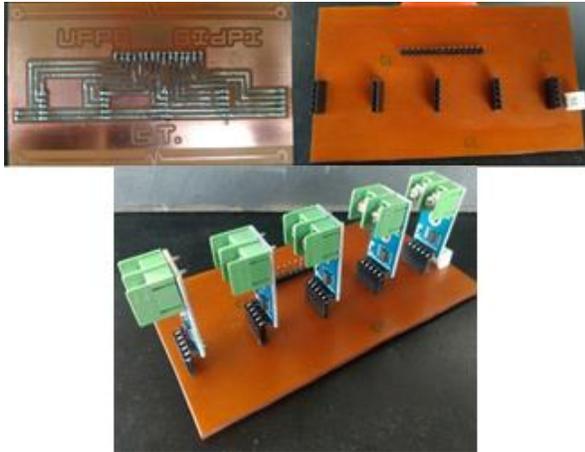
Placa Arduino mega

5 módulos MAX6675

Modulo electrónico para conexión.

#### DESCRIPCION DE LA PRACTICA:





Realizar las conexiones correspondientes mostradas en las figuras anteriores y programar el controlador con el siguiente código:

```

max6675 Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
max6675 $
#include <max6675.h>
int ktcS01 = 41; //termocupla 1
int ktcCS1 = 39;
int ktcCLK1 = 37;
MAX6675 ktc1(ktcCLK1, ktcCS1, ktcS01);
int ktcS02 = 35; //termocupla 2
int ktcCS2 = 33;
int ktcCLK2 = 31;
MAX6675 ktc2(ktcCLK2, ktcCS2, ktcS02);
int ktcS03 = 29; // termocupla 3
int ktcCS3 = 27;
int ktcCLK3 = 25;
MAX6675 ktc3(ktcCLK3, ktcCS3, ktcS03);
int ktcS04 = 23; //termocupla 4
int ktcCS4 = 22;
int ktcCLK4 = 24;
MAX6675 ktc4(ktcCLK4, ktcCS4, ktcS04);
int ktcS05 = 26; // termocupla 5
int ktcCS5 = 28;
int ktcCLK5 = 30;
MAX6675 ktc5(ktcCLK5, ktcCS5, ktcS05);

float t1, t2, t3, t4, t5;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(500);}

void loop() {
  t1 = (ktc1.readCelsius());
  t2 = (ktc2.readCelsius());
  t3 = (ktc3.readCelsius());
  t4 = (ktc4.readCelsius());
  t5 = (ktc5.readCelsius());
  Serial.print("temperatura = ");
  Serial.println(t1);
  delay(500);}

Compilado
El Sketch usa 4718 bytes (1%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 253952 bytes.
Las variables Globales usan 233 bytes (2%) de la memoria dinámica, dejando 7959 bytes para las variables

```

Se debe verificar la lectura de las 5 termocuplas en el monitor serial de Arduino.

Conservar las conexiones para la siguiente guía.

## FACULTAD DE INGENIERÍAS – INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## GUIA 2: IMPRIMIR VARIABLES DE TEMPERATURA EN DISPLAYS CON ARDUINO

**OBJETIVO:**

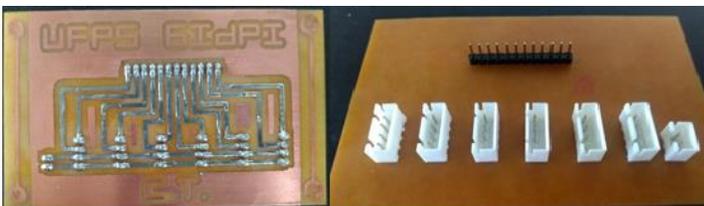
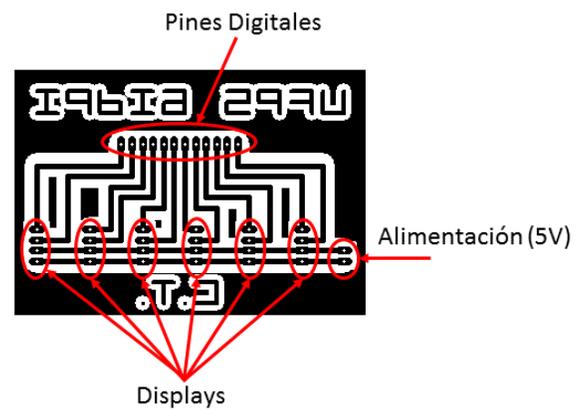
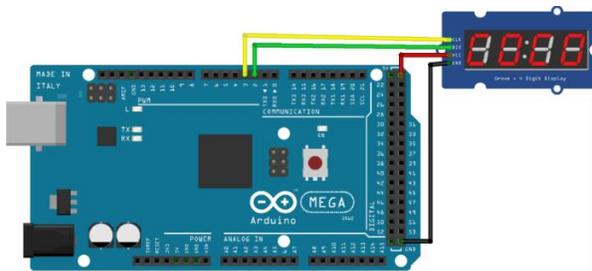
Utilizar displays 7 segmentos para mostrar variables de temperatura tomadas desde Arduino.

**MATERIALES:**

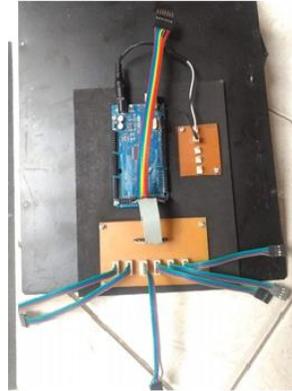
5 displays 7 segmentos de 4 dígitos

Modulo electrónico para conexión de displays con la tarjeta Arduino

Materiales de la guía 1

**DESCRIPCION:**

Realizar las conexiones indicadas en las figuras anteriores, se debe programar el controlador con el código correspondiente a la lectura de las termocuplas ( guía 1 ) mas el siguiente código para la visualización de en los displays.



```

programacion_6_displays Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
programacion_6_displays $
#include "TM1637.h"
#define CLR1 53 // display 1
#define DIO1 51
TM1637 Display1(CLR1,DIO1);
int8_t T1[] = {0,0,0,0};

#define CLR2 49 // display 2
#define DIO2 47
TM1637 Display2(CLR2,DIO2);
int8_t T2[] = {0,0,0,0};

#define CLR3 45 //display 3
#define DIO3 43
TM1637 Display3(CLR3,DIO3);
int8_t T3[] = {0,0,0,0};

#define CLR4 41 //display 4
#define DIO4 39
TM1637 Display4(CLR4,DIO4);
int8_t T4[] = {0,0,0,0};

#define CLR5 37 //display 5
#define DIO5 35
TM1637 Display5(CLR5,DIO5);
int8_t T5[] = {0,0,0,0};

void setup() {
  Display1.set(7);
  Display1.init();
  Display2.set(7);
  Display2.init();
  Display3.set(7);
  Display3.init();
  Display4.set(7);
  Display4.init();
  Display5.set(7);
  Display5.init();
}

```

```

programacion_6_displays Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
programacion_6_displays $
void loop() {
//display 1
T1[0] = int(t1/1000);
T1[1] = int((t1%1000)/100);
T1[2] = int((t1%100)/10);
T1[3] = int(t1%10);
Display1.display(T1);
//display 2
T2[0] = int(t2/1000);
T2[1] = int((t2%1000)/100);
T2[2] = int((t2%100)/10);
T2[3] = int(t2%10);
Display2.display(T2);
//display 3
T3[0] = int(t3/1000);
T3[1] = int((t3%1000)/100);
T3[2] = int((t3%100)/10);
T3[3] = int(t3%10);
Display3.display(T3);
//display 4
T4[0] = int(t4/1000);
T4[1] = int((t4%1000)/100);
T4[2] = int((t4%100)/10);
T4[3] = int(t4%10);
Display4.display(T4);
//display 5
T5[0] = int(t5/1000);
T5[1] = int((t5%1000)/100);
T5[2] = int((t5%100)/10);
T5[3] = int(t5%10);
Display5.display(T5);
}

```

Someter las termocuplas a cambios de temperatura para verificar que las lecturas se estén actualizando.

## FACULTAD DE INGENIERÍAS – INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

### GUIA 3: COMUNICACIÓN HALF DUPLEX ENTRE ARDUINOS CON NRF24L01

#### OBJETIVO:

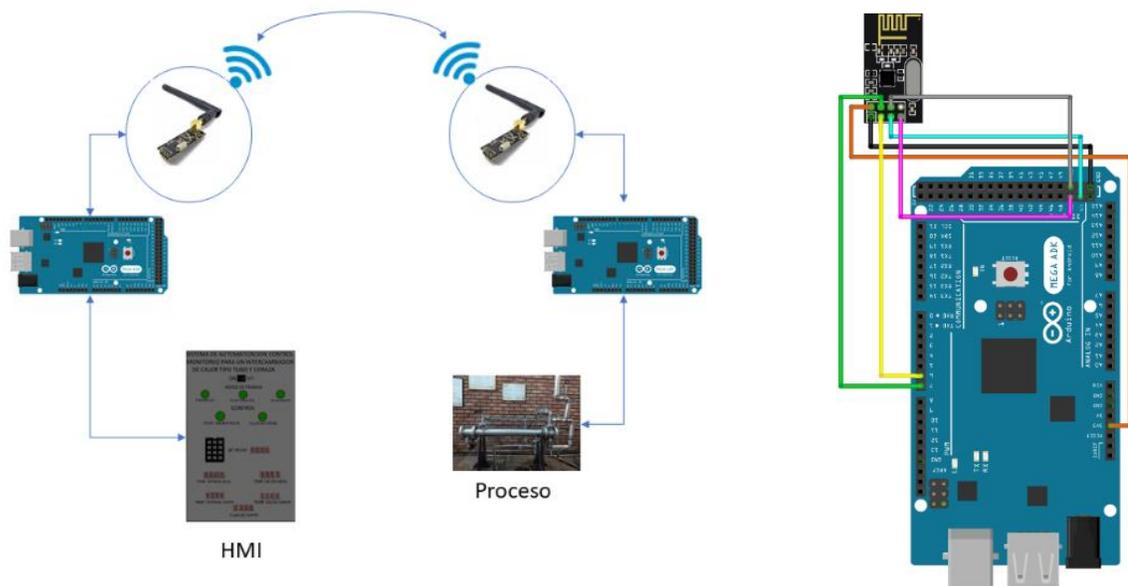
Realizar comunicación half-dúplex entre dos tarjetas Arduino, mediante tecnología radiofrecuencia y el módulo NRF24L01.

#### MATERIALES:

2 placas Arduino mega

2 módulos NRF24L01

#### DESCRIPCION DE LA PRACTICA:

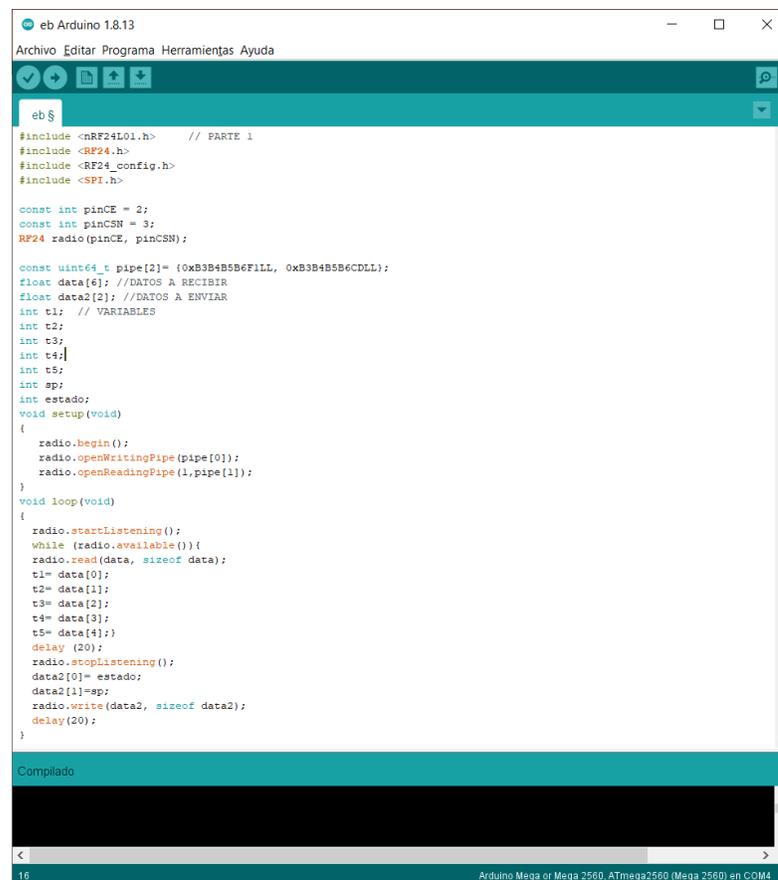


Haciendo uso de los materiales de las guías anteriores, realizar las conexiones necesarias para hacer una analogía con el diagrama anterior en donde en la parte 1 debe estar un controlador

Arduino junto con los displays, y en la parte 2 debe estar un controlador Arduino con los termopares, además en cada una de las dos partes debe conectarse el módulo NRF24L01 como lo indica el diagrama.

### PROGRAMACION PARTE 1:

Para el controlador de la parte 1 se debe cargar la programación correspondiente a los displays (guía 2), junto con el siguiente código.



```

eb Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
eb $
#include <nRF24L01.h> // PARTE 1
#include <RF24.h>
#include <RF24_config.h>
#include <SPI.h>

const int pinCE = 2;
const int pinCSN = 3;
RF24 radio(pinCE, pinCSN);

const uint8_t pipe[2] = {0xB3B4B5B6FILL, 0xB3B4B5B6CDLL};
float data[6]; //DATOS A RECIBIR
float data2[2]; //DATOS A ENVIAR
int t1; // VARIABLES
int t2;
int t3;
int t4;
int t5;
int sp;
int estado;
void setup(void)
{
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(pipe[0]);
  radio.openReadingPipe(1, pipe[1]);
}
void loop(void)
{
  radio.startListening();
  while (radio.available()){
    radio.read(data, sizeof data);
    t1= data[0];
    t2= data[1];
    t3= data[2];
    t4= data[3];
    t5= data[4];
    delay (20);
    radio.stopListening();
    data2[0]= estado;
    data2[1]=sp;
    radio.write(data2, sizeof data2);
    delay(20);
  }
}
Compilado
16 Arduino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM4

```

Esta parte será encargada de recibir las lecturas de las temperaturas vía radiofrecuencia desde la parte 2 y mostrarlas en los displays, además enviará un valor de referencia y el estado en el que se encuentre.

## PROGRAMACION PARTE 2

Para el controlador de la parte 2 conectado a las termocuplas, se debe cargar el código correspondiente a las termocuplas (guía 1), junto con el siguiente código.



```
rb $
#include <RF24L01.h> // PARTE 2
#include <RF24.h>
#include <RF24_config.h>
#include <SPI.h>

const int pinCE = 2;
const int pinCSN = 3;
RF24 radio(pinCE, pinCSN);

const uint64_t pipe[2] = {0xB3E4B5B6F7F8, 0xB3E4B5B6C7D8};
float data2[2]; // DATOS A RECIBIR
float data[6]; // DATOS A ENVIAR
int t1; // VARIABLES
int t2;
int t3;
int t4;
int t5;
int estado;
int sp;

void setup(void)
{
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(pipe[1]);
  radio.openReadingPipe(1, pipe[0]);
}

void loop(void)
{
  radio.startListening();
  while(radio.available()){
    radio.read(data2, sizeof data2);
    estado = data2[0];
    sp = data2[1];
    delay(20);
    radio.stopListening();
    data[0]=t1;
    data[1]=t2;
    data[2]=t3;
    data[3]=t4;
    data[4]=t5;
    radio.write(data, sizeof data);
    delay(20);
  }
}
```

Esta parte se encarga de leer los valores de las temperaturas de las termocuplas y enviarlas a la parte 1.