



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DEL
CALDERO ELECON 7.5 BHP DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS
TÉRMICAS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Mecatrónico

AUTORES: JONATHAN ALEXANDER CALDERON RIVAS.
ITALO ADOLFO RIVERA VERDUGO.

TUTOR: ING. MONICA ALEXANDRA ROMERO SACOTO, MSC.

CO-TUTOR: ING. ANGEL EUGENIO CARDENAS CADME, MSC.

Cuenca – Ecuador

2022

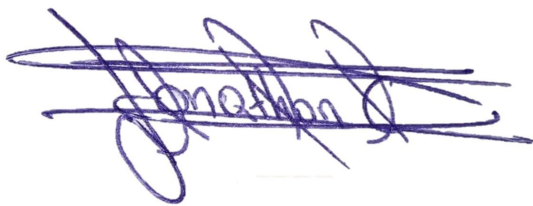
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jonathan Alexander Calderón Rivas con documento de identificación N° 0750420309 e Ítalo Adolfo Rivera Verdugo con documento de identificación N° 0302493515; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 29 de julio del 2022

Atentamente,



Jonathan Alexander Calderón Rivas
0750420309



Ítalo Adolfo Rivera Verdugo
0302493515

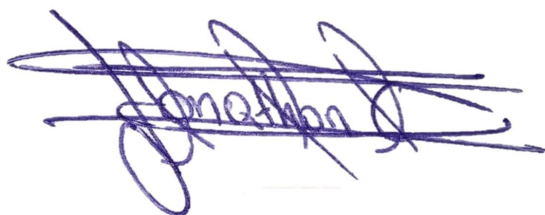
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Jonathan Alexander Calderón Rivas con documento de identificación N° 0750420309 e Ítalo Adolfo Rivera Verdugo con documento de identificación N° 0302493515, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Diseño del sistema automatizado de control del caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecatrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de julio del 2022

Atentamente,



Jonathan Alexander Calderón Rivas
0750420309



Ítalo Adolfo Rivera Verdugo
0302493515

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mónica Alexandra Romero Sacoto con documento de identificación N° 0302209911, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DEL CALDERO ELECON 7.5 BHP DEL LABORATORIO DE MAQUINAS TÉRMICAS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, realizado por Jonathan Alexander Calderón Rivas con documento de identificación N° 0750420309 e Ítalo Adolfo Rivera Verdugo con documento de identificación N° 0302493515, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de julio del 2022

Atentamente,



Ing. Mónica Alexandra Romero Sacoto, MSc.
0302209911

Dedicatoria

Jonathan Alexander

Quiero dedicar este trabajo en primer lugar a Dios, quien me ha permitido mediante su guía poder llevar a cabo esta etapa de mi formación profesional.

A mis padres Severino y Rosa, que me han dado el derecho de la vida; a mis abuelos Asisclo y Ángela (QEPZ), quienes con esmero y esfuerzo me han ayudado de manera incondicional para poder alcanzar mis objetivos trazados. Gracias por su presencia, por estar en los momentos difíciles y de felicidad en este mundo. Además, dedicar a mi hermano, mis abuelos y demás familiares quienes han anhelado con entusiasmo que alcance mis metas propuestas.

Finalmente, dedico a mis docentes y amigos; que en este largo recorrido han aportado su granito de arena de la mejor manera.

Ítalo Adolfo

Dedico este trabajo a mis padres, que me enseñaron a afrontar la vida con firmeza y determinación. Me apoyaron en cada etapa, asegurándose de que en cada tropiezo sepa como levantarme y seguir adelante.

De la misma manera a cada una de las personas de las que adquirí conocimiento, el cual me ha ayudado a mejorar y madurar de la forma en la que lo he hecho.

Finalmente, se lo dedico a la vida, que me enseñó que sin importar lo injusto que pueda ser el mundo, con solo determinación y actitud es posible lograrlo todo. Y de la que aprendí una verdad que me han ayudado a mejorar cada día: “No existe nada imposible”.

Agradecimientos

Jonathan Alexander

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llevar a cabo esta etapa de mi formación profesional.

Agradezco profundamente a mis padres y abuelos, que me han brindado todo su apoyo, aprecio y cariño para hacer posible cada una de las metas que me he propuesto, gracias por el apoyo, acompañamiento, guía y ejemplo que me han brindado no solo como estudiante; sino también como ser humano, siendo uno de los promotores principales para cumplir con los objetivos que me he planteado.

Me gustaría además agradecer a mis tutores de Proyecto de Titulación Ing. Mónica Romero e Ing. Eugenio Cárdenas, quienes han dedicado gran parte de su tiempo a nosotros como estudiantes, por sus esfuerzos, destrezas y dedicación brindados al actual trabajo de titulación. Sus conocimientos, orientaciones y su paciencia han sido esenciales para culminar con el presente trabajo.

Ítalo Adolfo

Agradezco a mis padres y familia por el apoyo y las lecciones de vida. Sin ellos tal vez lo hubiese logrado, pero no con la felicidad y seguridad con la que concluyo esta etapa. Haber adquirido el conocimiento que hoy tengo a su lado, fue haber aprendido bien.

A mi querida Giuliana, quien estuvo a mi lado siempre firme desde el principio. Por el aliento y ánimo en los momentos más difíciles. Por ser aquella compañera incondicional que me brindó su cariño y apoyo sin pedir nada a cambio.

Y también al Ing. Eugenio Cárdenas, la Ing. Mónica Romero y mis amigos por haberme apoyado en aquellos momentos de mucha presión y haberme permitido lograrlo en el último tramo de la carrera.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIV
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del problema	2
2.3. Importancia y alcances	2
2.4. Delimitación	3
2.4.1. Espacial o geográfica	3
2.4.2. Temporal	3
2.4.3. Institucional	3
2.5. Problema General	3
2.6. Problemas Específicos	4
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. Hipótesis	4
4.1. Hipótesis General	4
4.2. Hipótesis Específicas	5

5. Marco Teórico	5
5.1. Calderos Industriales	5
5.1.1. Acuatubulares	6
5.1.2. Piro tubulares	6
5.1.3. Partes generales	7
5.1.4. Combustión	8
5.1.5. Sistemas para la generación de vapor.	8
5.1.6. Caldero ELECON 7.5 BHP	10
5.1.7. Tanque de Condensado	10
5.2. Diagramas de instrumentación P&ID	11
5.3. Norma ISA S5.1	11
5.4. Instrumentación y control	12
5.4.1. Sensores de Temperatura.	12
5.4.2. Sensores de Presión.	12
5.4.3. Sensores de Nivel.	13
5.4.4. Sensores de Flujo.	13
5.4.5. Actuadores.	14
5.5. Diseño.	14
5.6. Automatización.	14
5.6.1. PLC.	15
5.6.2. Lenguaje de Programación.	15
5.7. Protocolos de comunicación.	15
5.8. Niveles de la pirámide de automatización	16
5.8.1. Nivel Actuador - Sensor	17
5.8.2. Nivel de campo: Profibus.	17
5.8.3. Profibus DP	18
5.8.4. Profibus DA o PA	18
5.8.5. Nivel de célula o control: Profibus FMS.	18
5.8.6. Nivel Planta y Gestión.	19
5.9. Sistema de control.	19
5.9.1. Control PID	19
5.9.2. Método de Ziegler-Nichols	19
6. Marco metodológico	20
6.1. Metodología de la Investigación	20

6.1.1.	Levantamiento de información técnica del sistema actual del caldero .	20
6.1.2.	Descripción del proceso.	22
6.2.	Metodología del proceso	23
6.2.1.	Establecimiento de los parámetros iniciales del Caldero	23
6.2.2.	Tubería de transporte de fluidos	27
6.2.3.	Análisis de los gases de combustión	31
6.2.4.	Modelo matemático	31
6.2.5.	Selección de instrumentos	39
6.2.6.	Diseño del nuevo sistema.	51
6.2.7.	Control PID para válvula proporcional de vapor	59
6.2.8.	Simulación del nuevo sistema y distribución	66
6.2.9.	Costos de mano de obra.	67
7.	Resultados	68
7.1.	Parámetros que intervienen en la generación de vapor.	68
7.2.	Diseño de tubería	68
7.2.1.	Montaje de tubería	68
7.2.2.	Comportamiento del fluido en la red de distribución	70
7.3.	Parámetros de diseño del sistema automático	75
7.3.1.	Resultados de simulación del sistema automático.	77
7.3.2.	Costos de instrumentos.	79
7.3.3.	Costos de mano de obra.	80
8.	Conclusiones	83
9.	Recomendaciones	84
	Referencias	86
	ANEXOS	87
	Anexo A: Matriz de consistencia lógica.	88
	Anexo B: Diagrama de instrumentación P&ID del sistema actual.	90
	Anexo C: Código Matlab, control PID.	92
	Anexo D: Diagrama de instrumentación P&ID del sistema automático.	94

Lista de Tablas

1.	Características técnicas del caldero ELECON 7.5 BHP	23
2.	Diferencia de presiones y temperaturas	24
3.	Tabla de interpolación lineal	25
4.	Tabla de aceros	27
5.	Tabla de espesores	28
6.	Tensiones admisibles	28
7.	Coefficiente Y	29
8.	Tabla de factores de seguridad	30
9.	Entalpías de las sustancias de combustión	34
10.	Temperaturas de saturación	35
11.	Temperatura de llama.	36
12.	Sensores de flujo.	41
13.	Sensores de presión.	42
14.	Sensores de temperatura.	43
15.	Sensores de nivel.	44
16.	Válvulas de control proporcional.	45
17.	Electroválvulas.	46
18.	Interfaz humano - máquina.	47
19.	Ponderación sensores de flujo.	48
20.	Ponderación sensores de presión.	48
21.	Ponderación sensores de presión.	49
22.	Ponderación sensores de nivel.	49
23.	Ponderación válvula de control proporcional.	50
24.	Ponderación Electroválvula.	50
25.	Ponderación Electroválvula.	51
26.	Accesorios.	58
27.	Ponderación Electroválvula.	80
28.	Costo de mano de obra.	81

Lista de Figuras

1.	Caldera vertical BOSCH.	6
2.	Esquema general del funcionamiento de un generador de vapor.	9
3.	Caldero ELECON 7.5 BHP.	10
4.	Tanque de condensado.	11
5.	Pirámide de automatización CIM.	16
6.	Niveles jerárquicos del protocolo de comunicación industrial siemens.	16
7.	Interacción de Profibus DP y PA en una red	17
8.	Diagrama de comunicaciones de la red Profibus	18
9.	Modelo dinámico del caldero	37
10.	Pérdidas de calor producidas por el caldero	37
11.	Mezcla líquido-vapor	39
12.	Sensor de flujo Proline Promass A300	52
13.	Montaje Proline Promass A300	52
14.	Sensor de presión PMP75	53
15.	Montaje PMP75	53
16.	Sensor de temperatura TR15	54
17.	Montaje TR15	54
18.	Sensor de nivel Micropilot FMR60	55
19.	Montaje FMR60	55
20.	Válvula proporcional SIPART PS2	56
21.	Válvula selenoide EV225B	57
22.	Montaje EV225B	57
23.	Interfaz humano - máquina	58
24.	Sistema de control	59
25.	Planta sin control	60
26.	Planta sin control	61
27.	Planta con sistema de control de lazo cerrado	62
28.	Respuesta del sistema	63
29.	Respuesta del sistema en tiempo discreto	65
30.	Simulación LabVIEW	67
31.	Diseño sistema 3D: Caldero y tanque de condensado	69
32.	Diseño sistema 3D: intercambiador y vías de transporte de fluidos	70
33.	Simulación de presión en Ansys tramo 1.	71

34.	Simulación de temperatura en Ansys tramo 1.	71
35.	Simulación de Velocidad en Ansys tramo 1.	72
36.	Simulación de presión en Ansys tramo 2.	72
37.	Simulación de temperatura en Ansys tramo 2.	73
38.	Simulación de Velocidad en Ansys tramo 2.	73
39.	Simulación de presión en Ansys al distribuidor de vapor.	74
40.	Simulación de temperatura en Ansys al distribuidor de vapor.	74
41.	Simulación de Velocidad en Ansys al distribuidor de vapor.	75
42.	Respuesta del sistema de control.	76
43.	Panel de Control LabVIEW.	77
44.	Ejemplo 1: Resultados del sistema de control.	78
45.	Ejemplo 2: Resultados del sistema de control.	78
46.	Ejemplo 3: Resultados del sistema de control.	79
47.	Comunicación Profibus.	82

Resumen

En el presente documento se detallan las actividades realizadas para el desarrollo del diseño automático del caldero ELECON 7.5 BHP, ubicado dentro del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana. En este proyecto se analizó el funcionamiento del sistema actual, identificando las variables que intervienen en la generación de vapor y el rango de valores a los que trabaja. Esto se logró mediante la obtención de funciones dinámicas que describen el funcionamiento del sistema, partiendo de la combustión hasta la transmisión de flujo de calor hacia el agua contenida en el tanque. En base a estos parámetros se procedió con el dimensionamiento de los distintos elementos que conforman el sistema automatizado y se agregaron a la red como: tuberías, sensores, válvulas, entre otros. Se realizó una evaluación de cada instrumento tomando en cuenta puntos clave como: disponibilidad en el mercado, mantenibilidad, costo y más, para realizar la selección de estos siempre que cumplan con las especificaciones técnicas requeridas. También se propuso implementar una válvula de control de flujo proporcional de vapor, para lo cual se diseñó un controlador PID el cual fue convertido de tiempo continuo a tiempo discreto para evitar saturación en la adquisición de datos en una implementación futura. Todo el sistema fue simulado en el software ANSYS para un análisis de pérdidas de presión y temperatura del vapor transportado y en LabVIEW para observar su comportamiento, tanto de la red como del control de flujo másico. Finalmente, se generó documentos que servirán para la implementación del sistema, entre los que están: Diagrama P&ID de instrumentos, Bosquejo 3D del nuevo sistema, Datasheets de los instrumentos, Bosquejos de la posición de instalación de los instrumentos, etc. El alcance del proyecto fue hasta el diseño del sistema, se pretende que sea implementado en una segunda fase y que el estudio realizado en el presente sea un soporte.

Palabras clave: Diseño automático, variables, funciones dinámicas, combustión, control de flujo, instalación de instrumentos.

Abstract

The present document details the activities carried out for the development of the Automatic design of the ELECON 7.5 BHP boiler located inside the machine laboratory of the Salesian Polytechnic University. This project analysed the functioning of the of the current system, identifying the variables involved in the generation of vapour and the range of values to which it works. This was achieved by obtaining dynamic functions describing the operation of the system from combustion to transmission heat flow to the water contained in the tank. Based on these parameters, we proceeded with the dimensioning of the various elements that make up the automated system and will be added to the network as: pipes, sensors, valves, among others. An assessment was conducted of each instrument taking into account key points such as: market availability, maintainability, cost and more, to make the selection of these as long as they meet the technical specifications required. It was also proposed to implement a control valve proportional flow of vapor, for which a PID controller was designed which was converted from continuous time to discrete time to avoid saturation in the acquisition of data in a future implementation. The entire system was simulated in ANSYS software for analysis pressure and temperature losses of the transported vapour and LabVIEW to observe its behaviour, both of the network and of the mass flow control. Finally, it was generated documents that will be used for the implementation of the system, among which are: Diagram PID of instruments, 3D sketch of the new system, Datasheets of instruments, Sketches of the position of installation of instruments, etc. The scope of the project was up to the design of the system, it is intended that it be implemented in a second phase and that the study carried out in the present is a support.

Keywords: Automatic design, variables, dynamic functions, combustion, flow control, installation of instruments.

1. Introducción

Los calderos industriales son máquinas térmicas utilizadas para la generación de vapor de agua, el cual es utilizado en distintas aplicaciones dentro de procesos de producción. Algunas de las tareas en las que se utilizan son: esterilización, calentamiento de tanques, movimiento o impulso de actuadores, limpieza, humidificación, etc. Este tipo de equipos trabajan a presiones y temperaturas altas, por lo que su diseño debe ser realizado de forma precisa para evitar accidentes laborales. Deben fabricarse con un buen aislamiento que por lo general es a base de fibra de vidrio, esto para evitar fugas de energía calorífica mejorando su eficiencia y eliminando la posibilidad de quemaduras al contacto con la carcasa exterior. Además de los usos industriales, también son utilizados en instituciones académicas para la realización de prácticas en carreras ingenieriles. Esto a razón de que para el diseño, construcción y control de este tipo de equipos requiere de conocimientos de áreas como: termodinámica, instrumentación, redes industriales, control, entre otras. El aprendizaje de estas asignaturas con la ayuda de un material práctico como lo es un caldero industrial facilita la comprensión de su funcionamiento, los parámetros a los que se debe dar importancia para mantener una alta seguridad del equipo. La Universidad Politécnica Salesiana es una institución educativa localizada en la ciudad de Cuenca, fundada en el año de 1994. A la fecha es una de las universidades con mejor equipamiento e infraestructura del país, brindando un excelente soporte a la educación práctica y experimental de los estudiantes de las distintas carreras. Cuenta con laboratorios orientados a las distintas áreas como: Metrología, Resistencia de materiales, Neumática, Hidráulica, etc. También mantienen un laboratorio de máquinas térmicas en el que se encuentra un caldero industrial, ELECON modelo 7.5 BHP. Este es utilizado para reconocimiento de instrumentos y para la obtención de datos para análisis termodinámico.

2. Problema

2.1. Antecedentes

La Universidad Politécnica Salesiana es una institución educativa que cuenta con laboratorios totalmente equipados para el desarrollo y experimentación en el área de máquinas térmicas. A lo largo de los años se han adquirido varios equipos y maquinaria de alta calidad, con el fin de brindar a sus estudiantes conocimientos tanto teóricos como prácticos para carreras técnicas como: Mecatrónica, Mecánica, Automotriz, Electrónica, entre otras. Están a la disposición máquinas y equipos que permite a los futuros ingenieros analizar procesos de manera real y acertada; entre los que destacan el laboratorio de control totalmente integrado "LACTI".

Como parte del laboratorio de LACTI se encuentra el Caldero ELECON 7.5 BHP que fue adquirido hace aproximadamente 15 años, para ser instalado en el laboratorio de máquinas térmicas y hasta la actualidad no ha tenido ninguna mejora tecnológica para tener un método de enseñanza-aprendizaje acorde a la tecnología actual.

2.2. Descripción del problema

En la Universidad Politécnica Salesiana dentro del laboratorio de máquinas térmicas se cuenta con el Caldero ELECON 7.5 BHP, el cuál es utilizado para componentes prácticos dentro de materias como Instrumentación, Termodinámica y Transferencia de calor. Forma parte del laboratorio de control totalmente integrado LACTI aplicándose a sistemas de control industrial. En base a esto se han desarrollado prácticas de dichas asignaturas, las cuales se alinean únicamente a reconocimiento, más no de manejo e instrumentación como tal del caldero. Se debe tomar en cuenta que la adquisición de este Caldero con gran alcance educativo no ha sido completamente aprovechado. El desarrollo del aprendizaje práctico de áreas como control y automatización de procesos industriales; mediante esta tecnología, no ha requerido la atención debida durante mucho tiempo. Esto se evidencia con el poco uso que se le da actualmente. Además, las únicas carreras que le dan una aplicación educativa son mecatrónica y mecánica; pudiendo extenderse a otras carreras.

2.3. Importancia y alcances

La Universidad Politécnica Salesiana tiene como objetivo preparar a los futuros ingenieros para que solventen necesidades y resuelvan problemas en un entorno real, para ello es necesario

que sus laboratorios contengan equipos con tecnologías actuales, por lo que se requiere realizar mejoras continuas.

Se planteó que, mediante el diseño del sistema automático del caldero; los estudiantes puedan desarrollar y mejorar sus conocimientos prácticos visualizados y controlando las variables que intervienen en el proceso de generación de vapor que en el futuro será de utilidad para ser aplicado a procesos de control industrial.

Adicionalmente, se realizó la documentación necesaria que sirva como base fundamental para la implementación del nuevo sistema en el caldero. Una vez implementado el sistema, los docentes de asignaturas como: control, PLC y redes industriales, automatización industrial, entre otras; lograrán realizar mejoras en los componentes prácticos actuales para los estudiantes, los cuales podrán monitorear y manipular el sistema automático del caldero.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

Este proyecto se realizó en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Perteneciente a la región andina al sur del Ecuador.

2.4.2. Temporal

El proyecto fue aprobado el día 6 de abril de 2022, fecha en la que inicia formalmente su desarrollo. A partir de la misma se tuvo 6 meses para concluirlo.

2.4.3. Institucional

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo dentro del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.5. Problema General

- ¿Se podrá diseñar el sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Se podrá identificar las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana?
- ¿Es factible delimitar los parámetros de diseño del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana?
- ¿Es idóneo generar documentación para la implementación del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Diseñar el sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Delimitar los parámetros de diseño del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Generar la documentación para la implementación del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis General

- Se diseñará el sistema automático para el control mono civilizado del caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana.

4.2. Hipótesis Específicas

- Se identificará las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Se delimitará los parámetros de diseño del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Se generará documentación para la implementación del sistema automático para el control del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana

5. Marco Teórico

En este capítulo se describen los conceptos básicos necesarios para entender el funcionamiento de un sistema automático para el control e instrumentación de un caldero generador de vapor.

5.1. Calderos Industriales

Los calderos o generadores de vapor son máquinas térmicas utilizadas en la industria para realizar ciertos trabajos. Transforman la energía en dos tipos de frecuencia de flujo: la energía química que se encarga de liberar cierto tipo de combustible de estado sólido, líquido o gaseoso para ser quemado en el hogar de la caldera y convertirla en energía térmica. Esta energía permite que a partir de la energía transmitida al agua se pueda generar vapor.(Ordoñez y Pullaguari, 2011) (González y Castaño, 2021)

Para que el diseño de un caldero generador de vapor sea óptimo, cada una de las partes deben estar cuidadosamente dimensionadas haciendo que el sistema se mantenga equilibrado. Dentro de los calderos que utilizan combustión para aumentar su temperatura existen dos tipos: Acuotubulares y Piro-tubulares.(Ordoñez y Pullaguari, 2011)

Figura 1

Caldera vertical BOSCH.



Nota: En la figura, se aprecia un caldero de tipo industrial de la marca BOSCH. (“Calderas de vapor de tres pasos Bosch Industrial Universal UL-S, UL-SX - Industria alimentaria - Calderas de vapor de tres pasos”, s.f.)

5.1.1. Acuatubulares

Este tipo de caldero trabaja de tal forma que el fluido se transporta por el interior de tubos durante su calentamiento. A su vez, los gases de combustión se desplazan por el exterior realizando de esta forma la transferencia de calor y obteniendo el vapor de agua. Se los utiliza cuando se requiere presiones por encima de 22 bares. Cabe mencionar que por su diseño constructivo estos calderos trabajan con bajos volúmenes de líquido. (Barrera Puigdollers Cristina y Édgar, 2016)

5.1.2. Piro-tubulares

En los calderos piro-tubulares los gases de combustión circulan en el interior de tubos atravesados en el recipiente metálico donde reposa el agua. Este tanque está atravesado en su interior por los tubos mencionados anteriormente, los cuales calientan el líquido obteniendo así el vapor. Estos sistemas son utilizados cuando se requieren presiones inferiores a 22 bares. Por su diseño y construcción son capaces de contener grandes volúmenes de agua, lo cual permite que se adapten a las variaciones de la instalación de manera más eficiente. (Barrera Puigdollers Cristina y Édgar, 2016)

5.1.3. Partes generales

Dependiendo del tipo de caldero las partes que lo constituyen pueden variar, para este caso específico se analizan los pirotubulares (González y Castaño, 2021) (Martinez, 2017):

- **Coraza.** Es un cilindro generalmente construido de chapa de acero, dentro del cual se encuentra alojado de manera integral la cámara de agua, cámara de vapor, cámara de combustión y el haz de tubos.
- **Cámara de agua.** Es el volumen específico que ocupa el agua en el cilindro interior de la caldera.
- **Cámara de vapor.** Espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, encargada de separar el vapor del agua.
- **Cámara de combustión.** En esta parte de la caldera se realiza la reacción química o relación estequiométrica del combustible (combustión), produciendo la liberación de energía del combustible que se transferirá al agua.
- **Haz de tubos.** Está compuesto por múltiples tubos de menor diámetro que el de la cámara de combustión; cuya función es capturar la mayor parte de energía de los gases.
- **Tapas.** Sirve para tener acceso a los espejos para el mantenimiento y limpieza de la caldera; generalmente estas tapas se encuentran empernadas.
- **Chimenea.** Se encarga de emanar los gases de combustión hacia el medio ambiente.
- **Quemador.** Esta parte de la caldera se encarga de generar la llama que provoca la liberación de energía del combustible. Generalmente, su funcionamiento depende de la llegada de aire al quemador para la relación estequiométrica del sistema.
- **Envolvente exterior.** Es el encargado de transportar los fluidos y realizar el montaje de la instrumentación necesaria para el control y supervisión del sistema.
- **Dispositivos de control y seguridad.** Son los encargados de garantizar el óptimo funcionamiento del caldero. Entre ellos se encuentran sensores y actuadores

5.1.4. Combustión

La combustión se define como el proceso físico - químico en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como producto de la respuesta de combustión se obtiene la formación de una llama emitiendo luz y calor. Existen varios tipos de combustión que se definirán a continuación.(Cueva, 2017)

- **Combustión completa.** Es aquella reacción en la que el combustible reacciona exotérmicamente hasta alcanzar el máximo grado posible de oxidación. Obteniendo como resultado, no habrá sustancias de combustibles en los gases producto de la combustión, solamente se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 en los productos.(Cueva, 2017)
- **Combustión incompleta.** Es aquella reacción en la que el combustible no alcanza el máximo grado de oxidación y el oxígeno no alcanza el valor teórico necesario para la formación del CO_2 , H_2O , SO_2 , y se originan en los gases de combustión, monóxido de carbono, hidrógeno y partículas sólidas de carbono, azufre o sulfuros. Si se toma en cuenta que se eliminan a la atmósfera estos componentes adicionales que contienen aún apreciable contenido calorífico, se puede decir que las pérdidas de calor cuando se produce una combustión incompleta son elevadas.(Cueva, 2017)
- **Combustión estequiométrica.** La combustión de tipo estequiométrica se encarga de establecer las relaciones de los compuestos involucrados en una reacción química. En este caso, la relación de combustible - comburente donde la estequiometría es la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesario para producir la oxidación total del combustible para que no se originen gases inquemados. De manera que no estaría presente el oxígeno O_2 .(Cueva, 2017)
- **Exceso de aire.** Durante un proceso de combustión real es un exceso de aire a la cantidad estequiométrica requerida, la llama se enfría, lo que puede llevar a una combustión incompleta del combustible, produciéndose CO, donde la presencia de inquemados en los gases producidos es nula.(Cueva, 2017)

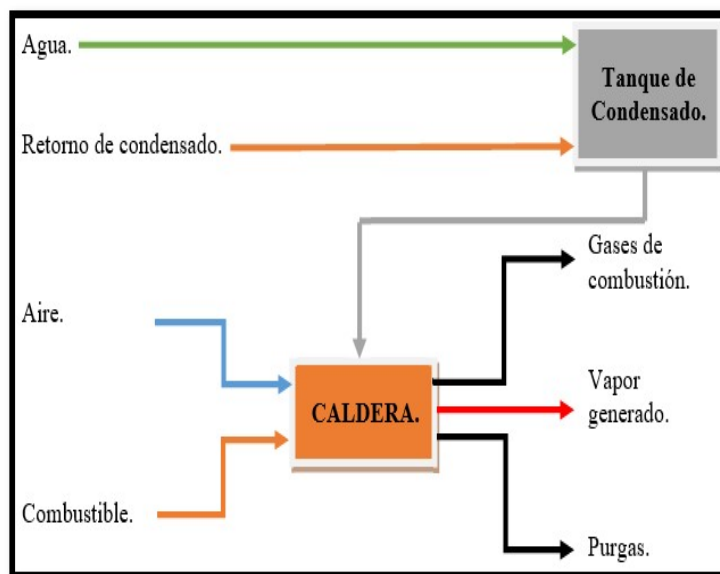
5.1.5. Sistemas para la generación de vapor.

Los sistemas para la generación de vapor difieren de una planta a otra; sin embargo, la mayoría constan básicamente de lo mostrado en la figura 1. En este esquema, el tanque de condensado recibe agua fría generalmente procedente de los suavizadores y condensado

caliente proveniente en su gran mayoría del proceso, por lo cual la temperatura del tanque de precalentado y por ende del agua de alimentación a la caldera básicamente depende de la cantidad de retorno de condensado que se tenga (si es que no se calienta a través de un medio adicional, por ejemplo vapor), el agua es ingresada a la caldera por medio de una bomba. Donde pasará de líquido subenfriado a vapor saturado al recibir calor proveniente de la reacción de combustión entre el combustible y el comburente, para ello generalmente se inyecta una cantidad de aire por encima del punto estequiométrico para asegurar una completa combustión y que no existan inquemados, por lo que a la salida de la caldera se tiene por una parte el vapor generado, agua en caliente, gases de combustión con una temperatura superior a la del vapor generado (gases calientes) y purgas que mantienen básicamente la caldera libre de lodos y con los sólidos totales disueltos en el rango deseado, obviamente también se tienen pérdidas por convección y radiación que no se muestran en el esquema de la figura 2.(Gabriel Pando y Pelaez, 2019)

Figura 2

Esquema general del funcionamiento de un generador de vapor.



Nota: Se presenta el esquema general de funcionamiento de un sistema generador de vapor conformado por un calderero y un tanque de condensado.(Gabriel Pando y Pelaez, 2019)

5.1.6. Caldero ELECON 7.5 BHP

El caldero ELECON 7.5 BHP es de tipo pirotubular vertical. Es utilizado para fines académicos dentro de la planta de los laboratorios de máquinas térmicas y laboratorio de automatización y control totalmente integrado (LACTI) de la Universidad Politécnica Salesiana; a continuación, en la figura 3 se muestra el caldero dentro de las instalaciones de la Universidad. Para su funcionamiento; tiene incorporado un PLC LOGO 230 RC de la marca SIEMENS en la caja de control; este caldero usa como combustible el gas licuado del petróleo "GLP".

Figura 3

Caldero ELECON 7.5 BHP.



Nota: Se observa la vista frontal del caldero ELECON 7.5 BHP que se encuentra en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad.(Calderón y Rivera, 2022)

5.1.7. Tanque de Condensado

El caldero ELECON 7.5 BHP cuenta con un tanque de condensado incorporado a la planta, el cual permite un precalentado para el ingreso de agua al caldero a una temperatura adecuada y que alimenta constantemente al caldero en el proceso de generación de vapor. En la figura 4 se muestra el tanque de condensado implementado en la Universidad.

Figura 4

Tanque de condensado.



Nota: Se visualiza la vista frontal del tanque de condensado marca ELECON.(Calderón y Rivera, 2022)

5.2. Diagramas de instrumentación P&ID

Piping and instrumentation diagram traducido al español como diagrama de instrumentación o canalizaciones de planta, es un esquema donde se registra a todos los instrumentos sobre un diagrama de flujo del proceso. Estos registros están dados por símbolos y nomenclaturas, se encuentran desarrollados en diferentes estándares, en particular la norma ISA (Instrument Society of American). Los sistemas de control de proceso se representan en diagramas de tuberías e instrumentos, bombas, motores y otros elementos auxiliares (Carballo y Romero, 2011)

5.3. Norma ISA S5.1

ISA S5.1 se define como:

“Un medio uniforme para representar e identificar instrumentos o dispositivos y sus funciones inherentes, sistemas y funciones de instrumentación y funciones de software de aplicación utilizadas para medición, monitoreo y control, sistemas, funciones de instrumentación presentando un sistema de designación que incluye esquemas de identificación y símbolos gráficos” (ISA-5.1, 2009)

5.4. Instrumentación y control

El caldero además de su estructura y tuberías esta constituido de un conjunto de sensores y actuadores. Estos instrumentos realizan mediciones y control de variables como: temperatura, presión, nivel y flujo; son dispositivos que detectan cambios dentro de entornos y responden a la salida de un sistema. Un sensor toma una señal física y la transforma en magnitudes de voltaje, corriente o resistencia para poder procesar los valores y utilizar los datos medidos según la necesidad presente. Mientras que un actuador permite realizar una acción dentro del sistema en función de las variables del proceso. (DEWESoft, 2020)

La instrumentación y control son un requerimiento indispensable en los generadores de vapor, con la finalidad de satisfacer la necesidad de consumo y a su vez ofrecer una mayor seguridad de trabajo del sistema hacia los operarios.

5.4.1. Sensores de Temperatura.

La temperatura constituye una de las magnitudes medidas más comunes e importantes que se realizan dentro de los procesos industriales. Los sensores de temperatura se basan en diversos fenómenos para realizar la medición y entre los cuales figuran: (Creus Sole, 1997)

- Variaciones en volumen o estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases)
- Variación de resistencia de un conductor (sondas resistivas)
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores)
- f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares)
- Intensidad de la radiación emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación)

5.4.2. Sensores de Presión.

La presión es la fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como: pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi. Las mediciones se pueden realizar en valores absolutos o diferenciales, basándose en los conceptos de presión absoluta, relativa y diferencial. Los sensores se clasifican en dos tipos, mecánicos y eléctricos. A continuación, se nombra los más utilizados: (Creus Sole, 1997)

- Tipo Diafragma
- Tipo Fuelle

- Tipo Tubo de Bourdon
- Capacitivos
- Resistivos
- Piezoeléctricos

5.4.3. Sensores de Nivel.

La toma de datos de nivel tiene una relevancia muy importante en el funcionamiento correcto del proceso; así como, en la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales. Los sensores de nivel pueden subdividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos. Entre los medidores mas conocidos tenemos: (Creus Sole, 1997)

- Manométrico
- De membrana
- Tipo burbujeo
- De presión diferencial de diafragma
- Resistivos
- Ultrasónico
- De radiación

5.4.4. Sensores de Flujo.

En la medición volumétrica se determina el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente por desplazamiento o indirectamente por deducción. Entre los más utilizados tenemos: Presión diferencial, Área variable, Velocidad, Tensión inducida, entre otros. Por otro lado la determinación del caudal masa puede realizarse a partir de una medida volumétrica compensándola para las variaciones de densidad del fluido o medir directamente el caudal masa aprovechando características medibles de la masa del fluido. Los medidores másicos se subdividen en: Compensación de presión y temperatura, Térmico, Momento, Fuerza de coriolis. (Creus Sole, 1997)

5.4.5. Actuadores.

Los actuadores son dispositivos cuya misión es generar movimiento según las órdenes dadas por la unidad de control; son capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, aire, y energía eléctrica. El actuador recibe la orden de un controlador y proporciona la salida necesaria para activar a un elemento final de control como son: válvulas, pinzas, atomizadores, puntas de soldar, entre otros. Los Actuadores se clasifican en cuatro grupos dependiendo de la energía que utilizan como, por ejemplo: Neumáticos, accionados por aire comprimido; Hidráulicos, que utilizan líquido para aplicaciones de cargas altas; Eléctricos, los cuales consumen energía eléctrica que genera un campo magnético para lograr su movimiento. (Peralta, Gallegos, y Condori, 2020)

5.5. Diseño.

En ingeniería se puede definir como un proceso sistemático, creativo y flexible, en el cual se incluye una generación, evaluación sistemática y puesta a prueba de especificaciones para la invención o creación de dispositivos, sistemas, infraestructura cuya forma y función permitan alcanzar los logros establecidos para satisfacer una serie de restricciones específicas que se suelen generar a partir de una necesidad o una situación problemática. (Camacho, Arenas, y Duque, 2012)

5.6. Automatización.

La automatización es la incorporación de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos tanto mecánicos como electrónicos que aseguren su control y buen comportamiento. El automatismo permite reaccionar frente a situaciones previstas e imponderables, su principal objetivo es procurar la reducción de costes de fabricación, mejorar calidad de producción, liberar al ser humano de tareas tediosas, peligrosas e insalubres de tal manera que los recursos humanos presenten una situación más favorable de trabajo. (Moreno, 2020)

La automatización integra una gran variedad de descubrimientos ingenieriles en procesos de producción, su modelo estructural esta compuesto de una parte operativa que se encarga de la ejecución de diferentes actividades que forman parte de un proceso y un sistema de control que coordina las actividades del proceso para mejorar en la calidad de producción. Esto implementa una infinidad de dispositivos como: PLC, transductores, temporizadores, dispositivos lógicos de control, sensores, actuadores, entre otros. (Cruz Reyes, 2017) (Moreno, 2020)

5.6.1. PLC.

NEMA (National Electrical Manufacturers Association) define a un controlador lógico programable (PLC) como:

“Un dispositivo electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones con el fin de implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales o analógicos, varios tipos de máquinas o procesos” (Carrillo, Polo, y Esmeral, 2005)

Un PLC es un sistema de control industrial basado en un computador, genera instrucciones para la toma de decisiones de encendido y apagado; el implementar esta tecnología satisface las exigencias de procesos continuos y discontinuos. El controlador lógico programable permite regular variables medidas como: presiones, temperaturas, niveles y caudales. (Martínez., 2015)

5.6.2. Lenguaje de Programación.

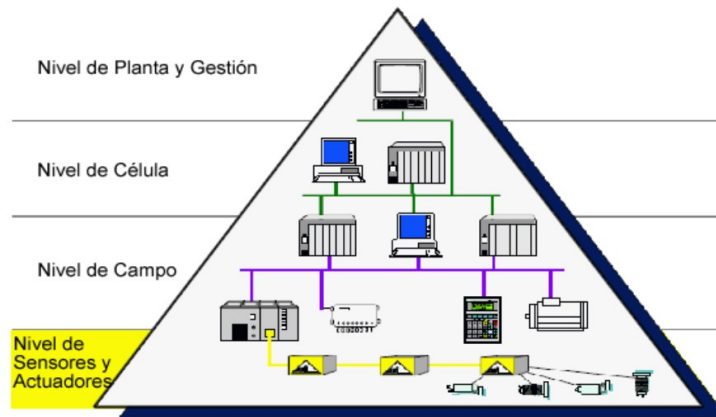
Es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que son ejecutados por un PLC. Los lenguajes de programación para PLC pueden ser visuales y escritos. Los visuales permiten estructurar el programa por medio de símbolos gráficos y diagramas de bloques y los escritos son listados de sentencias que describen las funciones a ejecutar. Uno de los lenguajes más implementados en la industria es el "Ladder" también llamado escalera, es un lenguaje de programación gráfico que está basado en esquemas de control eléctricos con relés. (Dahl-Skog, 2012)

5.7. Protocolos de comunicación.

Los protocolos de comunicación industrial son mecanismos de transmisión de datos o información entre los diferentes niveles de la pirámide de automatización necesarios para llevar a cabo tareas de control y gestión en un determinado proceso, se puede entender como protocolo al conjunto de reglas que permite el intercambio de información simultánea entre diferentes dispositivos que componen una red industrial como por ejemplo: actuadores, sensores, HMI, variadores de frecuencia, etc.(Chamorro y Toro, 2015)

Figura 5

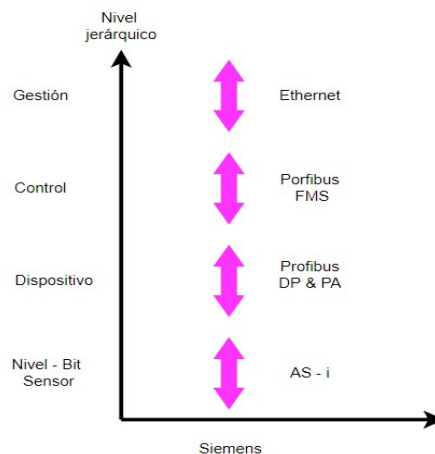
Pirámide de automatización CIM.



Nota: Se muestra el orden jerárquico de los niveles de la pirámide CIM. (Barragan, 2008)

Figura 6

Niveles jerárquicos del protocolo de comunicación industrial siemens.



Nota: Se observa el nivel jerárquico del protocolo de comunicación industrial de Siemens, el cual será parte de este trabajo. (Chamorro y Toro, 2015)

5.8. Niveles de la pirámide de automatización

La pirámide de automatización CIM por sus siglas en inglés (Computer Integrated Manufacturing), que en español significa “fabricación integrada por computador” consta de cuatro niveles mostrados en la figura 5 y 6, se describen a continuación. (Chamorro y Toro, 2015)

5.8.1. Nivel Actuador - Sensor

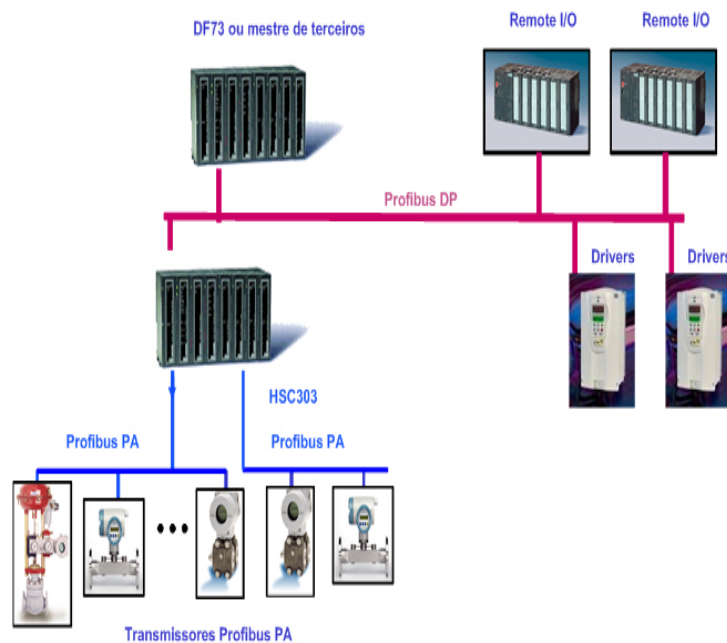
Es el nivel más bajo de la pirámide, entre los estándares de comunicación son: AS-i, DeviceNet, HART; conocidos como redes de control o buses de campo, cuya función es comunicar los dispositivos como sensores, actuadores, transductores, etc. (Chamorro y Toro, 2015)

5.8.2. Nivel de campo: Profibus.

En este nivel se realiza la comunicación entre instrumentos de control y mando con dispositivos E/S así como gestionar sus funciones. Profibus ofrece soluciones para aplicaciones discretas y procesos de automatización que se describen a continuación. (Chamorro y Toro, 2015)

Figura 7

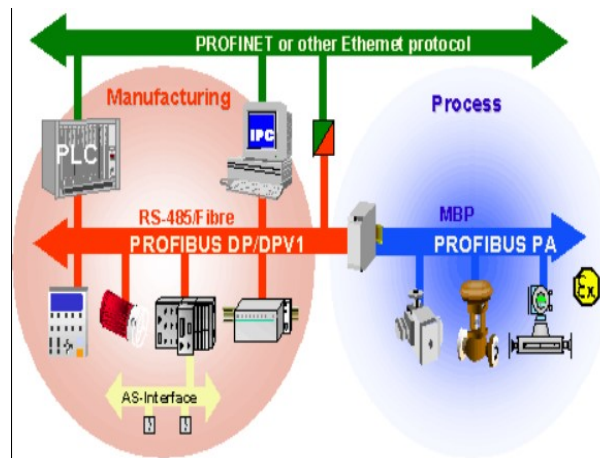
Interacción de Profibus DP y PA en una red



Nota: Se presenta un ejemplo de la interacción entre profibus DP y PA de una red de comunicación Profibus. (Chamorro y Toro, 2015)

Figura 8

Diagrama de comunicaciones de la red Profibus



Nota: Se observa un ejemplo de una red de comunicación Profibus. (Chamorro y Toro, 2015)

5.8.3. Profibus DP

Profibus decentralized peripherals esta diseñado para comunicar los sistemas automatizados y dispositivos de E/S, maneja velocidades altas hasta de 1KByte en menos de 2ms a una velocidad de 12 Mbit/s, permite conectar hasta 126 dispositivos E/S. Sustituye la tecnología de 4 a 20 mA y Hart.(Chamorro y Toro, 2015)

5.8.4. Profibus DA o PA

Profibus process automation reemplaza la transmisión de 4 a 20 mA, permite conectar hasta 32 dispositivos con velocidades de hasta 31.5 Kbit/s y un alcance de 1900 m ampliable a 10 km con repetidores. (Chamorro y Toro, 2015)

5.8.5. Nivel de célula o control: Profibus FMS.

Profibus FMS emite las órdenes de ejecución al nivel de campo y recibe información del mismo. Profibus fieldbus message specification esta diseñado para comunicarse a nivel de célula o control entre dispositivos como HMI, PLC, PC, etc. Es una conexión que tiene como función la supervisión, transmisión de grandes volúmenes de datos, comunicaciones de tipo maestro esclavo y multi-maestro.(Chamorro y Toro, 2015)

5.8.6. Nivel Planta y Gestión.

Es el nivel más elevado de la planta y aquí se integran los niveles inferiores de la pirámide CIM. El Ethernet es el más usado en los niveles superiores ya que ofrece altas velocidades de transmisión de datos con velocidades de 10/100/1000 Mbit/s, puede ser transmitido por medios eléctricos, ópticos o inalámbricos y alcanzar distancias hasta 4.3 Km.(Chamorro y Toro, 2015)

5.9. Sistema de control.

Se considera a un sistema de control como un conjunto de elementos encargados de regular el comportamiento de una variable dentro de una estructura, con la finalidad de evitar fallos o resultados no deseados. Se clasifican en dos tipos: Sistema de control de lazo abierto y Sistema de control de lazo cerrado; diferenciándose en que el segundo mantiene un elemento que censa la señal de salida para retro-alimentarla. La finalidad de este es realizar mediciones y establecer acciones correctivas dentro de la red. (Nise, 2015)

5.9.1. Control PID

Un controlador PID es un elemento o dispositivo que regula, corrige y controla una señal dentro de un sistema de lazo cerrado para obtener una salida deseada. Este tiene como entrada la suma del valor referencial de la variable a controlar y el error producido en la planta. Está estructurado por 3 elementos representados por ganancias: proporcional, integral y derivativa; la cuales le dan su nombre y tiene un efecto en la respuesta en estado estable. (Nise, 2015)

- Acción proporcional: A medida que aumenta el error en estado estable disminuye para aumentar la velocidad de respuesta.
- Acción integral: se aumenta esta ganancia para disminuir el error con la velocidad deseada, pero a su vez resulta en un sistema cada vez mas inestable.
- Acción derivativa: esta se aumenta progresivamente para conseguir la estabilidad requerida de la respuesta.

5.9.2. Método de Ziegler-Nichols

Este método permite ajustar las ganancias de un controlador PID de forma empírica, sin importar si se conoce o no las ecuaciones de la planta o del sistema a controlar. Estas reglas fueron publicadas en 1942 y propuestas por Ziegler y Nichols, desde entonces es uno

de los métodos de sintonización de ganancias PID más ampliamente difundido y utilizado en el medio. Los valores que se proponen por este método intentan conseguir en el sistema retro-alimentado una respuesta a una señal escalón con un sobre-disparo máximo del 25 %, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas. (Dorf y Bishop, 2011)

6. Marco metodológico

6.1. Metodología de la Investigación

6.1.1. Levantamiento de información técnica del sistema actual del caldero

El caldero del laboratorio de máquinas térmicas en la actualidad cuenta un sistema que controla el encendido y apagado del mismo. Sin embargo, los instrumentos que contiene en su mayoría no permiten realizar un control y monitoreo del estado del sistema a través del elemento, como la temperatura a la que está trabajando y a la que está transportándose el agua y el vapor por las tuberías. El nivel del líquido que esté contenido en el tanque, la presión interna que están soportando los distintos instrumentos y conexiones. Todo esto en conjunto disminuye la seguridad del sistema, impidiendo que los estudiantes puedan manipularlo sin la necesidad de un docente o laboratorista que los supervise. Para comprender la situación en la que se encuentra el sistema incluyendo el caldero como tal y las distintas conexiones y elementos adicionales, se realizó un levantamiento de información. Reconociendo el estado actual de cada uno de los instrumentos (medidores, válvulas, indicadores, etc.) así como la disposición de cada uno de estos. Para ello se dividió el sistema en áreas: caldero (pirotubular), tanque de condensado, intercambiador de calor y distribuidor de vapor. A continuación, se presenta un listado de los instrumentos que contiene cada área.

- **Caldero ELECON 7.5 BHP.**

- Tanque.

- Quemador de gas propano.

- PLC SIEMENS LOGO! 230 RC.

- Relé Térmico. Medidor de vidrio de nivel.

- Medidor de nivel en (alto - medio - bajo).

- Indicadores de nivel.

- Medidor de presión del tanque.

- Indicador de presión.

Medidores de temperatura.

Válvulas check.

Válvulas de seguridad.

Válvulas de cierre rápido.

Electroválvulas.

■ **Suministro de combustible.**

Tanque de gas propano industrial.

Indicadores de presión.

Válvulas de cierre rápido.

Filtro de gas.

■ **Tanque de condensado**

Tanque.

Motor eléctrico.

Bomba mecánica tipo J.

Medidor de nivel de vidrio.

Sensor de temperatura.

Indicador de temperatura.

RTD.

Válvulas de cierre rápido.

Válvulas check.

Electroválvula.

■ **Distribuidor de vapor.**

Tanque

Medidor de temperatura.

Medidor de presión.

Válvulas de cierre rápido.

■ **Intercambiador de calor.**

Tanque intercambiador.

Sensores de temperatura.

Indicadores de temperatura.

Módulos transmisores de datos.

válvulas de cierre rápido.

Electroválvulas.

Válvula bypass.

Válvulas check.

■ **Sistema de distribución**

Tubo de 1/2 in, 1 in, 2 in.

Uniones de 1/2 in, 1 in, 2 in.

Codos de 1/2 in, 1 in, 2 in.

Tubo de protección térmica de 3 in.

Fibra mineral de 3 in.

Una vez identificados los instrumentos, se procedió con el diseño del diagrama P&ID del sistema actual del caldero (ver Anexo B) , el cuál esta diseñado en especificaciones establecidas por la norma ANSI/ISA 5.1 año 2009.

6.1.2. Descripción del proceso.

El funcionamiento del sistema inicia cuando el agua ingresa al tanque de condensado a una temperatura media de 18 °C para realizar un proceso de precalentado a 40 °C para posteriormente con ayuda de la bomba de tipo J llenar el caldero a una altura superior a la mitad del tanque, esto se realiza con la finalidad de mejorar la eficiencia, reduciendo el consumo de combustible (Gas GLP) aprovechando la misma energía térmica producida por el sistema; en dicho momento el quemador es encendido de manera manual para iniciar con el calentamiento del líquido el cual se encuentra reposando en el tanque. Esto ocurre de tal forma que el calor generado por la combustión de gas GLP, ingresa a las tuberías que atraviesan el líquido en el tanque produciéndose así una transmisión de calor por convección. Producto de ello se obtiene los gases de combustión, los cuales son expulsados al exterior por una chimenea de sección circular.

Al momento que el agua dentro del tanque llega a una temperatura de 100 °C empieza a desprender vapor, aumentando la presión interna, la cual debe ser superior a 2 bar para poder habilitar las válvulas y el fluido pueda circular directo al distribuidor, esta direcciona la vías de acceso al tanque de condensado e intercambiador en el cual mediante un diferencial de calor el agua regresa a estado líquido. Este condensado al igual que el que se produce en el distribuidor se trasportan al tanque de precalentado y recoge toda el agua que regresa para ser combinada con agua fría que ingresa por primera vez al sistema. Esta mezcla es calentada con el vapor que ingresa, generando así una redundancia mecánica. Un factor importante

es la seguridad que presenta actualmente el sistema, dando a conocer que solo cuenta con un modo de protección para no superar la presión de trabajo regulada actualmente a 4.5 bar; es decir, cuando alcance esta presión el quemador se apaga automáticamente. Además, cuenta con válvulas de seguridad para estos casos. Por otra parte, el quemador cuenta con una fotocélula que permite identificar la fuga o falta de gas lo cuál produce un paro del sistema.

6.2. Metodología del proceso

6.2.1. Establecimiento de los parámetros iniciales del Caldero

El caldero ELECON 7.5 BHP no cuenta con la información técnica necesaria para establecer condiciones de diseño para los nuevos instrumentos a implementar en el sistema automático. Partiendo de las especificaciones que se muestran en la tabla 1 se procederá con la obtención de los parámetros iniciales del caldero.

Tabla 1

Características técnicas del caldero ELECON 7.5 BHP

Tipo	Caldero vertical Piro tubular
Marca	ELECON
Tipo de combustible	GAS LP
Voltaje	110 V
Corriente	11 A
Controlador	SIEMENS LOGO! 230RC
Potencia Caldero	7.5 BHP
Material	Acero Inoxidable
Numero de Pasos	3
Numero de tubos	52 de in. Ced-10
Material tubos	ASTM A-312- T304.L

Nota: Se observan las especificaciones técnicas del caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.(ELECON, 2008)

De acuerdo con los datos de la tabla 1, la potencia del caldero es de 7.5 BHP; con la finalidad de obtener la presión de trabajo se debe calcular la potencia real; para ello se aplicó la ecuación 1.

$$P_1 + \frac{V_1}{T_1} = P_2 + \frac{V_2}{T_2} \quad (1)$$

Tabla 2

Diferencia de presiones y temperaturas

Cuenca	P ₁	10.93 PSI	10.93 PSI
Mar	P ₂	14.7 PSI	14.70 PSI
Cuenca	T ₂	60.8 °F	520.47 °R
Mar	T ₁	70 °F	529.67 °R
V ₁ /V ₂			1.321

Nota: Se muestra la diferencia de presiones y temperaturas para la obtención de la potencia real de caldero. (Danilo y Oswaldo, 2014)

Para obtener la potencia real del caldero se debe aplicar la ecuación 2.

$$P_{BHP} = \frac{P_c}{Const.da} \quad (2)$$

$$P_{BHP} = \frac{7.5 \text{ BHP}}{1.321}$$

$$P_{BHP} = 5.6818 \text{ BHP}$$

La presión de trabajo se obtiene a partir de la cantidad de 8.435 KCal./h de vapor que genera 1 BHP a 15.69 kg de H₂O a 100°C equivalente a 1 presión de atmósfera.

$$P = 5.6918 \text{ BHP} \cdot \frac{1 \text{ atm.}}{1 \text{ BHP}} \cdot \frac{14.6959 \text{ PSI}}{1 \text{ atm.}}$$

$$P = 83.49916 \text{ PSI.}$$

$$P = 575.70644237 \text{ KPa.}$$

Para determinar la temperatura de vapor saturado que genera el caldero a una presión de 575.70644237 KPa, se realiza una interpolación lineal (ecuación 3) con los parámetros de la tabla 3.

$$Y = Y_1 + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \cdot (X - X_1) \quad (3)$$

$$Y = 155 + \frac{160 - 155}{618.23 - 543.49} \cdot (575.70644 - 543.49)$$

$$Y = 157.155 \text{ } ^\circ \text{C}$$

Tabla 3

Tabla de interpolación lineal

X1	543.49 KPa.	Y1	155 °C
X	575.70644 KPa.	Y	157.155 °C
X2	618.23 KPa.	Y2	160 °C

Nota: En la tabla, se encuentran los valores del vapor saturado que genera el caldero en función de la presión que ofrece. (Calderón y Rivera, 2022)

De acuerdo a los valores de presión y temperatura que se presentan en la tabla 3, tomados del libro de termodinámica de Cengel, se trabajara con una temperatura de vapor saturado igual 160 ° C.

La eficiencia de la caldera es un factor importante a considerar, para ello se hará uso de la ecuación 4.

$$Q_H = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_w)}{\eta} \quad (4)$$

Como se desconoce el caudal másico producido por el caldero, se obtiene mediante la ecuación 5.

$$\dot{m}_v = P_{BHP} \cdot m_{BHP} \quad (5)$$

$$\dot{m}_v = 5.6818 \text{ BHP} \cdot 15.69 \text{ Kg.}$$

$$\dot{m}_v = 89.147442 \text{ Kg/h.}$$

La potencia térmica del caldero se debe obtener en nomenclaturas de Kw la cual aplica que 1 BHP es igual a 9.8095 Kw, obteniendo:

$$Q_H = 7.5 \text{ BHP} \cdot \frac{9.8095 \text{ Kw}}{1 \text{ BHP}}$$

$$Q_H = 73.57125 \text{ Kw.}$$

$$h_v = 2065.8 \text{ KJ/Kg} \cdot \frac{0.000277778 \text{ Kwh/Kg}}{1 \text{ KJ/Kg}}$$

$$h_v = 0.5738 \text{ Kwh/Kg}$$

$$h_w = 167.53 \text{ KJ/Kg} \cdot \frac{0.000277778 \text{ Kwh/Kg}}{1 \text{ KJ/Kg}}$$

$$h_w = 0.046536 \text{ Kw h/Kg}$$

En función de los parámetros adquiridos despejamos η para obtener la eficiencia térmica del caldero:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_w)}{Q_H} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{89.147442 \text{ Kg/h} \cdot (0.5738 \text{ Kwh/Kg} - 0.046536 \text{ Kw h/Kg})}{73.57125 \text{ Kw}}$$

$$\eta = 0.63889 \cdot 100\%$$

$$\eta = 63.88\%$$

Por consiguiente se obtendrá la cantidad de combustible que consume el caldero mediante la ecuación 7.

$$Q = \frac{P}{PCS} \quad (7)$$

$$Q = \frac{73.57125 \text{ Kw}}{13.97 \text{ Kw h/kg}}$$

$$Q = 5.26637 \text{ Kg/h}$$

El caldero produce dos tipos de calor, latente y suministrado obtenidos mediante las ecuaciones 8 y 10 respectivamente.

$$Q_L = \dot{m}_v \cdot \delta_h \quad (8)$$

$$\delta_h = h_g - h_f \quad (9)$$

$$\delta_h = (659 - 40) \text{ Kcal/kg}$$

$$\delta_h = 619 \text{ Kcal/kg}$$

$$Q_L = 89.147442 \text{ Kg/h} \cdot 619 \text{ Kcal/kg}$$

$$Q_L = 55182.2666 \text{ Kcal/kg}$$

$$Q_s = Q_L \cdot \eta \quad (10)$$

$$Q_s = 55182.2666 \text{ Kcal/kg} \cdot 0.87$$

$$Q_s = 48008.5719 \text{ Kcal/kg}$$

6.2.2. Tubería de transporte de fluidos

En este apartado se verifica que el material y dimensiones de la tubería implementados en el sistema actual fueran los ideales para poder reciclar los mismos y a su vez, hacer el montaje de nuevos instrumentos y adquirir la cantidad faltante para el sistema de transporte de fluidos.

Para ello se precede a la verificación del diseño de la tubería de transporte de fluido ya implementada, para lo cual se hará uso de la norma ASME B31_3.

El primer punto corresponde a la selección del material, de acuerdo a la norma ASME; la cual indica que la temperatura de trabajo no debe ser mayor que la permisible del material; siendo esta de acero inoxidable A312 TP 316L de tipo 304L y con las características que muestra la tabla 4 en función de la presión nominal.

Tabla 4

Tabla de aceros

PN ANSI	Material					Stainless Steel				
	Carbón		1,1 1/4Cr	2 1/4Cr	5Cr, 1/2 Mo	Type 304	Type 316	Type 304L Type316L	Type 309	Type 310
	Normal	C, 1/2Mo	1 Mo	1 Mo						
150 lb										
-20 to 100	265	265	290	290	290	275	275	230	260	260
200	260	260	260	260	260	235	240	195	230	230
300	230	230	230	230	230	205	215	175	220	220
400	200	200	200	200	200	180	195	160	200	200
500	170	170	170	170	170	170	170	145	170	170
600	140	140	140	140	140	140	140	125	140	140
650	125	125	125	125	125	125	125	110	125	125
700	110	110	110	110	110	110	110	95	110	110
750	95	95	95	95	95	95	95	80	95	95
7800	80	80	80	80	80	80	80	65	80	80
850	65	65	65	65	65	65	65		65	65
900	50	50	50	50	50	50	50		50	50
950	35	35	35	35	35	35	35		35	35
1000	20	20	20	20	20	20	20		20	20

Nota: Lista de materiales a seleccionar para la tubería de vapor en función de la temperatura de trabajo y presión, obteniendo varias posibilidades como se muestra en la tabla. (Plou, s.f.)

Una vez determinado el material, se calcula el espesor mínimo de la tubería mediante la

ecuación 11.

$$t_m = 0.5 \cdot \frac{P \cdot D_o}{S_E + P \cdot Y} \quad (11)$$

Para obtener el espesor mínimo, se selecciona el diámetro nominal de la tubería, que para este caso al estar implementado una tubería de 1/2 in. tiene un valor de 15mm, el cual según la tabla 5 establece una medida exterior de 21.3 mm. La tensión admisible y el coeficiente Y se obtiene de la tabla 6 y 7 respectivamente.

Tabla 5

Tabla de espesores

DN		DE	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI	ANSI
in	mm	mm	Sch10	Sch20	Sch30	Sch40	Sch60	Sch80	Sch100	Sch120	Sch140	Sch160
3/8	10	17.11	-	-	-	2.71	-	3.2	-	-	-	-
1/2	15	21.3	-	-	-	2.77	-	3.73	-	-	-	4.78
3/4	20	26.7	-	-	-	2.87	-	3.91	-	-	-	5.56
1	25	33.4	2.77	-	-	3.38	-	4.55	-	-	-	6.35
1 1/4	32	42.2	2.77	-	-	3.56	-	4.85	-	-	-	6.35
1 1/2	40	48.3	2.77	-	-	3.68	-	5.08	-	-	-	7.14

Nota: Valores de referencia para diámetros de tuberías según ANSI. (Plou, s.f.)

Tabla 6

Tensiones admisibles

Material / °C	-20.9 to 27.78	93.33	148.89	204.44	260	315.56	343.33
Material / °F	-20 to 100	200	300	400	500	600	650
A 106A	12	12	12	12	12	12	12
A 106 B	15	15	15	15	15	15	15
A 335 Gr P11	15	15	15	15	15	15	15
A312 TP 316 L	15.7	13.3	11.9	10.8	10	9.4	9.2

Nota: En la tabla, se observan los datos de las tensiones admisibles en función del material seleccionado acorde a ASME B13_1. (Plou, s.f.)

Tabla 7*Coeficiente Y*

Materia /°C	482	510	538	566	593	Material
Ac Ferrítico	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	-
Ac. Austenítico	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	A312 TP 316L
Otros metales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	A106 A, A106B, A335 GrP11
Hierro colado	0.4	-	-	-	-	

Nota: Valores del coeficiente Y en función de la temperatura y material seleccionado. (Plou, s.f.)

La tensión admisible según la tabla 6 está dada en unidades de Ksi para lo cual se transformara a unidades de KPa. siendo 10.8 ksi igual a 74463.38 KPa; este valor está dado por una temperatura mayor a la requerida.

$$t_m = 0.5 \cdot \frac{689.476 \text{ KPa} \cdot 21.3 \text{ mm}}{74463.38 \text{ KPa} + 689.476 \text{ KPa} \cdot 0.4}$$

$$t_m = 0.01 \text{ mm}$$

El espesor mínimo requerido para la tubería es de 0.01 mm, por consiguiente se selecciona el tubo normalizado según la tabla 4 y 5 con un Schedule 40 cuyo espesor es igual a 2.77 mm con un diámetro interior de 15.8 mm.

La velocidad a la que se transporta el fluido se obtiene mediante la ecuación 12.

$$\mu = \frac{4 \cdot \dot{m}_v}{\pi \cdot D_i^2} \quad (12)$$

El flujo másico que originalmente se obtuvo en unidades de kg/h, se hará una conversión a unidades de m^3/s .

$$\mu = \frac{4 \cdot 0.0000248 \text{ m}^3/s}{\pi \cdot (0.0158 \text{ m})^2}$$

$$\mu = 0.1265 \text{ m/s}$$

Para el diámetro de la tubería del transporte del combustible GLP se toma como referencia el diámetro actual del sistema, el cual nos indica ser de 3/8". Para este caso se seleccionara como material acero al carbono tipo A, de tal manera que al aplicar la ecuación 11 se obtendrá

el espesor mínimo.

$$t_m = 0.5 \cdot \frac{500 \text{ KPa} \cdot 17.1 \text{ mm}}{82800 \text{ KPa} + 500 \text{ KPa} \cdot 0.4}$$

$$t_m = 0.05 \text{ mm}$$

El espesor mínimo requerido para la tubería es de 0.05 mm, se procede con la misma aplicación de la tubería de vapor, ahora obteniendo un Schedule 40 cuyo espesor es igual a 2.31 mm y un diámetro interior de 12.6 mm. La velocidad de transporte de este combustible es de 8 m/s con un flujo másico de:

$$\dot{m}_v = \frac{8 \text{ m/s} \cdot \pi \cdot (0.0126 \text{ m})^2}{4}$$

$$\dot{m}_v = 0.0009975 \text{ m}^3/\text{s}$$

Luego de haber determinado varios aspectos del fluido, se debe de considerar que es un sistema que requiere de un gran control de seguridad para evitar explosiones u otros accidentes, por ello se calcula el factor de seguridad mediante la ecuación 13.

$$FS = \frac{\sigma_{ultimo}}{\sigma_{admisible}} \quad (13)$$

$$FS = \frac{1034213.86}{618230}$$

$$FS = 1.672619$$

Tabla 8

Tabla de factores de seguridad

TIPO O CLASE DE CARGA	ACERO, METALES DÚCTILES		HIERRO FUNDIDO, METALES FRÁGILES	MADERA DE CONSTRUCCIÓN
	Basado en la resistencia máxima*	Basado en la resistencia de fluencia**	Basado en la resistencia máxima*	
Carga muerta o Carga variable bajo análisis por fatiga	3 - 4	1.5 - 2	5 - 6	7

Nota: En la tabla, se presentan los valores mínimos recomendados para el factor de seguridad como establece el libro de Diseño de elementos de máquinas.(Montaner y Simon, s.f.)

6.2.3. Análisis de los gases de combustión

Se obtiene el modelo matemático de la cama de combustión, con el fin de conocer cuánta energía se transmite a partir de la combustión hacia el agua contenida en el tanque. De esta forma sabremos como se está comportando el sistema y la cantidad de aire que debe entrar. Para esto inicialmente se utilizó un analizador de gases de combustión de la marca BACHARACH PCA 400 para uso industrial, el cual permite hacer la medición de gases, para obtener las cantidades en porcentajes de los compuestos resultantes de la combustión.

$$O_2 = 13.3\%$$

$$CO_2 = 6.1\%$$

$$X_{aire} = 2.71$$

$$\text{temperatura fluido} = 137.4^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura externa} = 25.3^\circ\text{C}$$

$$\text{Diferencia de temperaturas} = 112^\circ\text{C}$$

$$\text{Eficiencia neta} = 85.1\%$$

$$\text{Pérdidas netas} = 14.9\%$$

$$CO = 1833\text{ppm}$$

$$SO_2 = 8\text{ppm}$$

6.2.4. Modelo matemático

El combustible usado es el GLP (gas licuado de petróleo), su composición es de 70% de propano (C_3H_8) y 30% de butano (C_4H_{10}). Se calcula el aire teórico como si fuera una combustión completa.



Carbón, C:

$$X = 0.7 \cdot 3 + 0.3 \cdot 4$$

$$X = 3.3$$

Hidrógeno, H_2 :

$$Y = 0.7 \cdot 4 + 0.3 \cdot 5$$

$$Y = 4.3$$

Oxígeno, O_2 :

$$at = X \cdot \frac{Y}{2} \quad (15)$$

$$at = 3.3 \cdot \frac{4.3}{2}$$

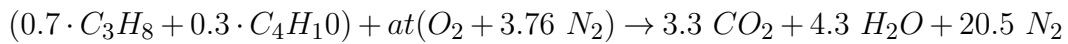
$$at = 5.3$$

Nitrógeno, N_2 :

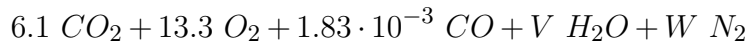
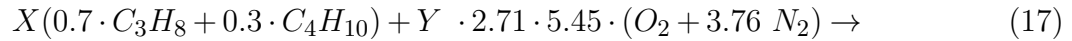
$$Z = 3.76 \cdot at \quad (16)$$

$$Z = 20.5$$

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación 14 se obtiene:



Se plantea la ecuación química real con el exceso de aire teórico y las salidas de los productos.



Carbono, C:

$$0.7 \cdot 3 \cdot X + 0.3 \cdot 4 \cdot X = 6.1 + 1.88 \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

$$X = 1.85$$

Hidrógeno, H_2 :

$$0.7 \cdot 4 \cdot X + 0.3 \cdot 5 \cdot X = \quad (19)$$

$$V = 7.9$$

Oxígeno, O_2 :

$$2.71 \cdot 5.45 \cdot Y = 6.1 + 13.3 + 1.88 \cdot 10^{-3} - \frac{3}{2} + \frac{7.9}{2} \quad (20)$$

$$Y = 1.58$$

Oxígeno, N_2 :

$$W = 3.76 \cdot 5.45 \cdot 3.76 \cdot Y \quad (21)$$

Oxígeno, N_2 :

$$W = 87.74 \quad (22)$$

Se reemplaza los valores y se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & 1.85(0.7 \cdot C_3H_8 + 0.3 \cdot C_4H_{10}) + 23.34 \cdot (O_2 + 3.76 N_2) \rightarrow \dots \\
 & \dots 6.1 CO_2 + 13.3 O_2 + 1.83 \cdot 10^{-3} CO + 7.9 H_2O + 87.74 N_2 \\
 & \frac{1.85(0.7 \cdot C_3H_8 + 0.3 \cdot C_4H_{10}) + 23.34 \cdot 2.71 \cdot 5.45 \cdot (O_2 + 3.76 N_2) \rightarrow}{1.85} \dots \\
 & \dots \frac{6.1 CO_2 + 13.3 O_2 + 1.83 \cdot 10^{-3} CO + 7.9 H_2O + 87.74 N_2}{1.85} \\
 & (0.7 \cdot C_3H_8 + 0.3 \cdot C_4H_{10}) + 12.61(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \dots \\
 & \dots 3.38 CO_2 + 7.189 O_2 + 1.016 \cdot 10^{-3} CO + 4.27 H_2O + 47.4 N_2 \quad (23)
 \end{aligned}$$

La relación de aire - combustible se calcula mediante la ecuación 24:

$$R = \frac{A}{C} \quad (24)$$

$$R = \frac{(4.76) \cdot (12.61) \cdot (29)}{(0.7)(36 + 8) + (0.3)(48 + 10)} = 33.11 \quad \text{Kg aire / kg combustible}$$

En base al aire teórico se obtiene su porcentaje:

$$\text{Porcentaje de aire teórico} = \frac{m_{\text{aire actual}}}{m_{\text{aire ideal}}} \quad (25)$$

$$\text{Porcentaje de aire teórico} = \frac{12.61}{5.45} = 2.68$$

268% de aire teórico en exceso.

Cantidad de agua que se condensa cuando los productos se enfrían a 25 °C a 344.7 KPa.

Presión de saturación de agua a 25 °C= 3.1698 KPa.

$$\frac{N_v}{N_{\text{prod. gas}}} = \frac{P_v}{P_{\text{prod}}} \quad (26)$$

$$\frac{4.27 - N_w}{62.24 - N_w} = \frac{3.1698}{344.7}$$

$$N_w = 3.63 \text{ Kmol.}$$

Por lo tanto, la mayor parte del vapor de agua en los productos (85%) se condensará cuando los gases del producto se enfrían hasta 25 °C.

La tasa de transferencia de calor si el combustible y el aire entran a 25 °C, y los productos salen a 127 °C.

$$Q_{\text{comb}} = \sum N_R(h_f + h - h_o)_R - \sum N_p(h_f + h - h_o)_p \quad (27)$$

Tabla 9

Entalpías de las sustancias de combustión

Sustancia	h _f [KJ/Kmol]	h _{298 °k} [KJ/Kmol]	h _{400 °k} [KJ/Kmol]
C ₃ H ₈	-103850	—	—
C ₄ H ₁₀	-126150	—	—
O ₂	0	8150	11711
N ₂	0	8141	11640
CO ₂	-393520	9364	13372
CO	-110530	8669	11644
H ₂ O	-241820	9904	13356

Nota: Se observan las variaciones que se presentan en las entalpías de cada uno de los compuestos que intervienen en la combustión a partir de tres variaciones de temperatura. (Calderón y Rivera, 2022)

$$Q_{\text{comb}} = (0.7 \text{ Kmol } C_3H_8) \left(-103850 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} C_3H_8 \right) + (0.3 \text{ Kmol } C_4H_{10}) \left(-126150 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} C_4H_{10} \right)$$

$$- (3.38 \text{ Kmol } CO_2) \left(-393520 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO_2 \right) - (7.189 \text{ Kmol } O_2) \left(-126150 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} O_2 \right)$$

$$- (47.4 \text{ Kmol } N_2) \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} N_2 \right) - (4.27 \text{ Kmol } H_2O) \left(-241820 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} H_2O \right)$$

$$- (1.016 \text{Kmol } CO_2) \left(-110530 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO_2 \right)$$

$$Q_{comb} = 2364427 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} C_3H_8; C_4H_{10}$$

Se obtiene la temperatura de la llama diabática:

$$\begin{aligned} & (3.38 \text{Kmol } CO_2) \left(-393520 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO_2 + h_{CO_2} - 9364 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO_2 \right) + (7.189 \text{Kmol } O_2) \dots \\ & \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} O_2 + h_{O_2} - 8150 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} O_2 \right) + (47.4 \text{kmol } N_2) \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} N_2 + h_{N_2} - 8141 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} \right) + \dots \\ & (4.27 \text{H}_2\text{O}) \left(-241820 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} H_2O + h_{H_2O} - 9904 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} N_2 + \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} H_2O \right) + \dots \\ & (1.016 \text{Kmol } CO) \left(-110530 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO + h_{CO} - 8669 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} CO \right) = \\ & (0.7 \text{Kmol } C_3h_8) \left(-103850 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} C_3h_8 \right) + (0.3 \text{Kmol } C_4H_{10}) \left(-126150 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} C_4H_{10} \right) \dots \\ & (3.38 \text{Kmol } CO_2) (h_{CO_2}) + (7.189 \text{Kmol } O_2) (h_{O_2}) + (47.4 \text{kmol } N_2) (h_{N_2}) + (4.27 \text{kmol } H_2O) (h_{H_2O}) + \dots \\ & (1.016 \text{Kmol } CO) (h_{CO}) = 3002189.334 + (-110540) = 2891649.334 \end{aligned}$$

$$h_f = \frac{2891649.334}{3.38 + 7.189 + 47.4 + 4.27 + 1.016}$$

$$h_f = 45714.1622 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

Tabla 10

Temperaturas de saturación

Sustancia	T_{@h_f}=45714.1622
O_2	1460.9255
N_2	1401.8226
CO_2	1053.8645
CO	1448.7225
H_2	1230.4009

Nota: Se observa la temperatura de cada sustancia producida por combustión en grados K. (Calderón y Rivera, 2022)

La temperatura recomendada para generar el primer análisis es de 1400°K

$$\begin{aligned}
 &(3.38Kmol\ CO_2)(h_{CO_2}) + (7.189Kmol\ O_2)(h_{O_2}) + (47.4kmol\ N_2)(h_{N_2}) + \dots \\
 &\dots(4.27kmol\ H_2O)(h_{H_2O}) + (1.016Kmol\ CO)(h_{CO}) = \\
 &(3.38Kmol\ CO_2)(65271) + (7.189Kmol\ O_2)(45648) + (47.4kmol\ N_2)(43605) + \dots \\
 &\dots(4.27kmol\ H_2O)(53351) + (1.016Kmol\ CO)(44007) = 2888176.334
 \end{aligned}$$

El resultado es bajo comparado con la relación, el siguiente análisis se lo hará una temperatura de 1440°K.

$$\begin{aligned}
 &(3.38Kmol\ CO_2)(67586) + (7.189Kmol\ O_2)(47102) + (47.4kmol\ N_2)(44988) + \dots \\
 &\dots(4.27kmol\ H_2O)(55198) + (1.016Kmol\ CO)(45408) = 2981318.146
 \end{aligned}$$

Se realiza una interpolación lineal entre los valores de relación y las temperaturas ya encontradas:

Tabla 11

Temperatura de llama.

Relación	Temperatura
2888176.334	1400
2891649.334	x
2981318.146	1440

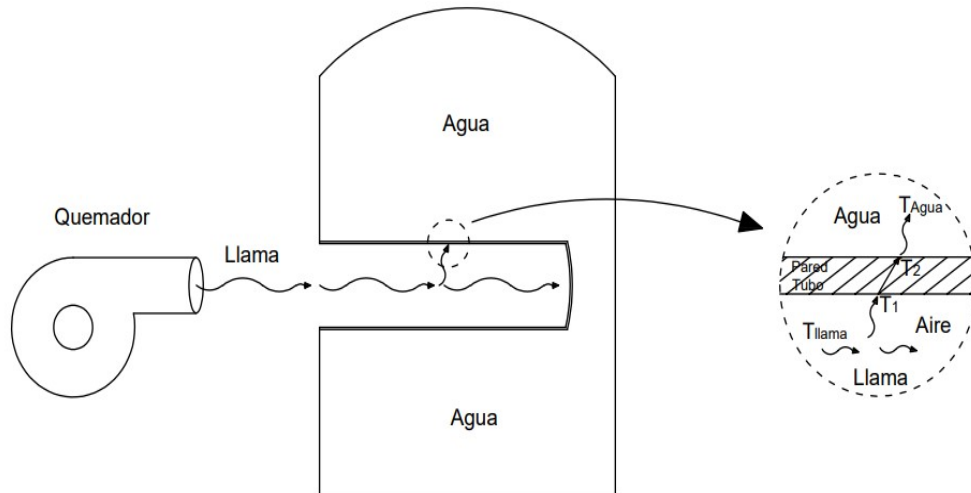
Nota: Se observan los datos para la interpolación lineal (Calderón y Rivera, 2022)

Se encuentra la temperatura de llama: T llama=1401.491 °K

Para obtener la ecuación dinámica del caldero se plantea la transmisión de calor de la combustión hacia el agua contenida dentro del tanque.

Figura 9

Modelo dinámico del caldero

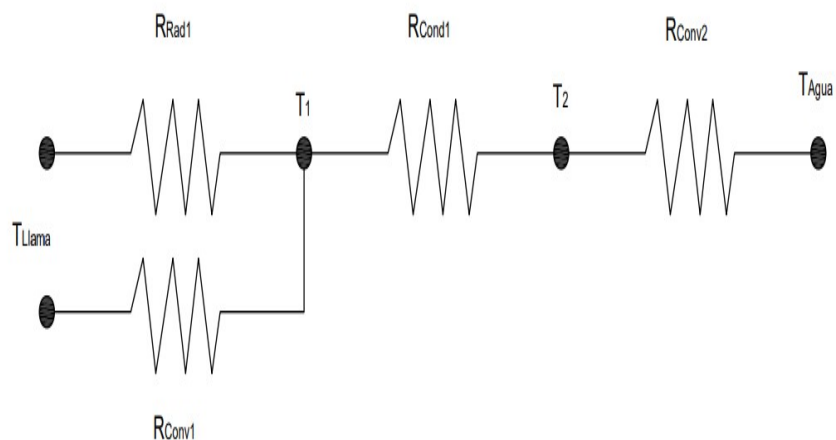


Nota: Se puede observar como se produce la transmisión de energía calorífica del caldero. (Calderón y Rivera, 2022)

En base a este modelo se plantean las pérdidas:

Figura 10

Pérdidas de calor producidas por el caldero



Nota: Se presenta un bosquejo de como se producen las pérdidas por radiación, convección y conducción del caldero. (Calderón y Rivera, 2022)

A partir de esto, se obtuvieron las resistencias de cada pérdida:

$$R_{Rad_1} = \frac{T_{llama} - T_1}{Q_{comb.}} \quad (28)$$

$$R_{Conv_1} = \frac{1}{(he)(\pi)(D_{int})(L)}$$

$$R_{Conv_2} = \frac{1}{(he)(\pi)(D_{ext})(L)}$$

$$R_{Cond_1} = \frac{(\ln \frac{D_{ext}}{D_{int}})}{2\pi K_{acero}}$$

Estas se suman para tener una resistencia equivalente:

$$R_{eq1} = \frac{1}{R_{Rad_1}} + \frac{1}{R_{Conv_1}} \quad (29)$$

$$R_{eqT} = R_{eq1} + R_{Cond_1} + R_{Conv_2} \quad (30)$$

Finalmente se plantea la ecuación dinámica primero calculando q_T :

$$q_T = Q_{comb} + R_{eqT} \quad (31)$$

$$\int_0^\theta d\theta = \int_{T_1}^{T_2} \frac{m \cdot C_v \cdot dT}{q_T} \quad (32)$$

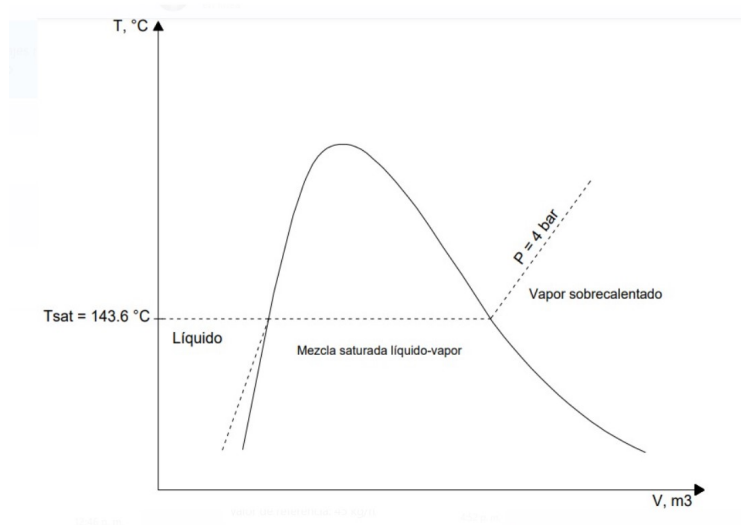
$$\int_0^\theta \frac{q_T \cdot d\theta}{m \cdot C_v} = \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (33)$$

Sabiendo que la válvula de salida de vapor se habilita al momento que la presión llega a 4 bares, se pudo obtener la temperatura de saturación de la mezcla de líquido-vapor 11 . En base a la tabla A-5E proporcionada por el libro de Termodinámica de Yanus Cengel y Michael Boles se obtuvo lo siguiente.

Tabla A 5E Tsat @ 4 bar=143.6°C

Figura 11

Mezcla líquido-vapor



Nota: Se muestra la gráfica de mezcla entre líquido y vapor del sistema. (Calderón y Rivera, 2022)

6.2.5. Selección de instrumentos

El sistema requiere de la integración de sensores y actuadores para aumentar la eficiencia y seguridad. Estos deben poseer características técnicas que se adapten de una manera sencilla y eficaz al sistema, evitando realizar adaptaciones complicadas ya sean mecánicas o eléctricas. En esta sección se realizó las propuestas de los sensores y actuadores que podrían ser implementados al sistema acorde a la necesidad especificada al inicio de este trabajo y son: presión, nivel, temperatura y caudal. A continuación, se presenta el listado de los tipos de instrumentos.

- Sensor de temperatura
- Sensor de presión
- Sensor de nivel
- Caudalímetro para vapor
- Electroválvula para vapor
- Electroválvula para agua

- Válvula proporcional para control de flujo de vapor
- PLC
- HMI

Se definió un criterio técnico para la preselección de los instrumentos. Este contiene especificaciones que independientemente de: marca, modelo, costo o durabilidad; deben tener para poder ser adaptados en el sistema. Se presentan estos puntos a continuación:

- Protocolo de comunicación Profibus
- Salida de señal analógica de 4 a 20 mA
- Temperatura máxima de trabajo por encima de 180 °C
- Presión máxima de trabajo por encima de 6 bar
- Materiales resistentes a la corrosión
- Montaje simple.

A partir de estas especificaciones se realizó la investigación de los posibles sensores y actuadores que se podrían utilizar para el diseño del sistema. De la tabla 8 a la 14 se describen los mismos. Por otra parte, no se realiza la selección del controlador lógico programable; debido a que se cuenta con un PLC S7-1200 dentro de la Universidad y que será el considerado para este trabajo.

Tabla 12*Sensores de flujo.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
SIEMENS	Sitrams FCS400	Rango: 0 – 3700 kg/h. Precisión: $\pm 0.10\%$. Material: Acero inoxidable 316L; Hastelloy C22. Temperatura de proceso: -50 a 200 °C. Presión de proceso: 100 bar. Conexión: Bridas ANSI / ASME B16.5. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$ 1875.56
ABB	Vartex Master FSV430	Precisión: $\pm 0,9\%$. Repetibilidad: DN 15 (½ in): $\pm 0,3\%$. Material: Acero inoxidable. Temperatura del proceso: 55 a 280 °C. Presión de proceso: 138 bar max. Comunicación: 4-20 mA, HART 7, Modbus RTU, PROFIBUS PA. Aplicaciones: Líquido, Gas, Vapor.	\$4044.45
Endress +Hauser	Proline Promas A300	Rango: 0 a 150 kg/h. Temperatura de proceso: -50 a +205 °C. Presión de proceso: 430.9 bar max. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS. Precisión: Caudal volumétrico $\pm 0,10\%$.	\$3458.95

Nota: Se observan los modelos, especificaciones técnicas y costos de los sensores de flujo propuestos. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 13*Sensores de presión.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
SIEMENS	Sitrans P300	Rango: 0 – 3700 kg/h. Rango: -970 mbar - 6 bar Temperatura de proceso: -40 °C...+100 °C Conexión: 1/214 NPT Material: Acero inoxidable. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS PA.	\$ 2212.49
Endress+Hauser	Cerabar PMP75	Rango: 0.4 - 400 bar. Precisión: 0,075% + influencia del sello del diafragma. Material de la membrana: 316L. Principales partes húmedas: Aleación C27 316L. Temperatura de proceso: -70°C - 400°C Presión de proceso: 420 bar max. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$1885,42
Endress +Hauser	PMD75	Rango: 10bar. Precisión: 0,075% + influencia del sello del diafragma. Material de la membrana: 316L. Principales partes húmedas: Aleación C27 316L. Temperatura de proceso: -70°C - 400°C Presión de proceso: 400 bar max. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$2055.42

Nota: Se aprecia los modelos, especificaciones técnicas y costos de los sensores de presión propuestos (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 14*Sensores de temperatura.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
Baumer	Sitrans TFRN	Rango: 50 - 400 °C. Precisión: B ($\pm 0,3$ °C a 0 °C) $\pm (0,3 + 0,005 \times t)$ °C Presión de proceso: 0 - 400 bar. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS. Tiempo de respuesta: <6,1 s, Ø6 mm.	\$ 1258.48
Endress+Hauser	TR15	Rango: -50 °C - 500 °C. Precisión: clase A según IEC 60751 Presión de proceso: 400 bar max. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$1456.25
PYROMATION	Single Element RTD	Rango: 0 – 200 °C Material: Acero inoxidable Conexión: Boquilla de acero inoxidable ½” Comunicación: 4-20 mA.	\$1247.13

Nota: Se describen modelos, especificaciones técnicas y costos de los sensores de temperatura propuestos (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 15*Sensores de nivel.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
Intai	INTAIPULS -NCR 30TFRN	Medición de nivel por radar para líquidos Rango: hasta 114 pies (25 m) Precisión: ± 0.08 in. (± 2 mm) Temperatura de proceso: -196°C a $+200^{\circ}\text{C}$. Presión del proceso: $-1 \dots +160$ bar. Comunicación: 2-cables 4-20 mA, 4-cables 4-20 mA, 4-cables Modbus	\$ 245.25
Endress+Hauser	Microlot FMR6	Medición de presión, nivel, volumen o masa de líquidos en tanques presurizados Rango: máx. 50 m. Rango: -1 hasta 16 bar. Precisión: ± 1 mm Material: 316L, aleación C. Temperatura de proceso: $-40 + 130^{\circ}\text{C}$ Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$874.55
UWT	Single NivoGuide 8000	Rango: máx. 6 m. Temperatura de proceso: -196°C hasta 450°C . Presión del proceso: -1 hasta $+400$ bar. Salida: 4 - 20 mA.	\$220.80

Nota: Se indican los modelos, especificaciones técnicas y costos de los sensores de temperatura propuestos (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 16*Válvulas de control proporcional.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
Siemens	Sitrans SIPART PS2	Material: hierro, aluminio. Rango de presión: 1,4 - 7 bar. Temperatura de proceso: 185 °C máx. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$ 2151.00
Siemens	SIPART PS100	Material: aluminio/policarbonato. Rango de presión: 1,4 - 7 bar. Temperatura de proceso: 185 °C máx. Comunicación: 4-20 mA, PROFIBUS.	\$1506.00
Jordanvalve	Single Mark 70SP	Material: hierro dúctil, acero al carbono, acero inoxidable, bronce. Rango de presión: 0,4 - 2,1 bar. Temperatura de proceso: 232 °C max.	\$1865.00

Nota: Se observan los modelos , especificaciones técnicas y costos de los tipos de válvulas proporcionales propuestas. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 17*Electroválvulas.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
Burkert	Sitrans 6240	Voltaje: 24 AC/DC. Temperatura de proceso: 0 – 180 °C. Presión de proceso: 160 bar máx. Potencia: 8W.	\$ 215.26
Danfoss	EV225B	Voltaje: 24 AC/DC. Temperatura de proceso: 0 – 185 °C. Presión de proceso: 10 bar máx. Potencia: 16W.	\$344.51
ASCO	Single Serie 8220	Voltaje: 24 AC/DC. Temperatura de proceso: 0 – 180 °C. Presión de proceso: 15 bar máx. Potencia: 16W.	\$1865.00

Nota: Se presentan los modelos , especificaciones técnicas y costos de las electroválvulas propuestas. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 18*Interfaz humano - máquina.*

Marca	Modelo	Especificaciones Técnicas	Precio
Siemens	Simatic Basic Panel KTP400	Pantalla: TFT, 64.000 Colores 4.3” Mando: Pantalla táctil y 4 teclas de función Memoria: 10MB Variables: 800 Alarmas: 1000	\$ 773.00
Siemens	Simatic Confort Panel TP700	Pantalla: TFT, 16 millones de colores. Formato Widescreen, ángulo de visión 170º, 7” Mando: Pantalla táctil Memoria: 2 SD CARD / 2 USB HOST / 1 USB device Variables: 2048 Alarmas: 4000	\$2699.00
Siemens	Simatic Unified Comfort Panel MTP1000	Pantalla: TFT, 16 millones de colores. Formato Widescreen, ángulo de visión 170º, 10.1” Mando: Pantalla multitáctil Memoria: 2 SD CARD / 4 Puerto USB 3.0 Variables: 8000 Alarmas: 9000	\$1865.00

Nota: Modelos, especificaciones técnicas y costos de los HMI propuestos. (Calderón y Rivera, 2022)

La selección de los sensores y actuadores se realizó en base a una ponderación de 5 puntos los cuales son: disponibilidad en el mercado, costo, mantenibilidad, adaptabilidad al sistema, calidad y flexibilidad. A cada instrumento se le otorgo una calificación de 0 a 5 puntos, con la finalidad de facilitar la selección de los elementos que se utilizarán. También se debe tomar en cuenta en el sistema actual cuenta con herramientas que pueden formar parte del nuevo diseño, por lo que se cotizo solo los requeridos. A continuación, de la tabla 15 a la 21 se muestran calificaciones por instrumento.

Tabla 19*Ponderación sensores de flujo.*

Aspectos.	Modelos		
	SIEMENS: Sitrans FCS 4000	ABB:Vortex Master FSV430	Endress+Hauser: Proline Promass A300
Disponibilidad en el mercado	3	3	3
Costo	5	3	4
Mantenibilidad	4	4	4
Adaptabilidad al sistema	5	4	5
Calidad	4	5	5
Flexibilidad	2	4	5
TOTAL	23	23	23

Nota: En la tabla, se establece la ponderación de los sensores de flujo. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 20*Ponderación sensores de presión.*

Aspectos.	Modelos		
	SIEMENS: SITRANS P300	Endress+Hauser: PMD75	Endress+Hauser: PMP75
Disponibilidad en el mercado	3	3	4
Costo	5	3	4
Mantenibilidad	4	4	5
Adaptabilidad al sistema	5	5	5
Calidad	5	5	5
Flexibilidad	5	4	5
TOTAL	27	24	28

Nota: Se muestra la ponderación de los sensores de flujo. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 21*Ponderación sensores de presión.*

Aspectos.	Modelos		
	Baumer: TFRN	Endress+Hauser: TR15	PYROMATION: Single Element RTD
Disponibilidad en el mercado	4	3	3
Costo	5	5	4
Mantenibilidad	3	4	3
Adaptabilidad al sistema	4	5	4
Calidad	4	5	3
Flexibilidad	4	5	4
TOTAL	23	27	21

Nota: Se evidencia la ponderación realizada de los sensores de flujo. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 22*Ponderación sensores de nivel.*

Aspectos.	Modelos		
	Endress+Hauser Microlot FMR60	UWT:Single NivoGuide 8000	Intai:INTAIPULS -NCR30
Disponibilidad en el mercado	4	3	3
Costo	5	3	4
Mantenibilidad	4	4	3
Adaptabilidad al sistema	5	5	3
Calidad	4	5	3
Flexibilidad	5	5	5
TOTAL	27	25	21

Nota: En la tabla, se encuentra la ponderación realizada de los sensores de nivel. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 23*Ponderación válvula de control proporcional.*

Aspectos.	Modelos		
	Siemens: SIPART PS2	Siemens: SIPART PS100	Jordanvalve: Mark 70SP
Disponibilidad en el mercado	3	2	3
Costo	3	5	4
Mantenibilidad	4	3	3
Adaptabilidad al sistema	5	5	3
Calidad	5	5	5
Flexibilidad	3	2	4
TOTAL	23	22	21

Nota: Se observa la ponderación realizada de los sensores de nivel. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 24*Ponderación Electroválvula.*

Aspectos.	Modelos		
	Danfoss: EV225B	ASCO: Serie 8220	Burkert: 6240
Disponibilidad en el mercado	5	4	4
Costo	5	4	3
Mantenibilidad	5	5	5
Adaptabilidad al sistema	5	5	5
Calidad	5	5	5
Flexibilidad	5	5	5
TOTAL	30	28	27

Nota: Se aprecia la ponderación realizada de los sensores de nivel. (Calderón y Rivera, 2022)

Tabla 25*Ponderación Electroválvula.*

Aspectos.	Modelos		
	Siemens: Simatic Basic Panel KTP400	Siemens: SIMATIC Comfort Panel TP700	Siemens: SIMATIC Unified Comfort Panel MTP1000
Disponibilidad en el mercado	5	4	4
Costo	5	4	3
Mantenibilidad	5	4	3
Adaptabilidad al sistema	5	5	5
Calidad	5	5	5
Flexibilidad	5	5	5
TOTAL	30	27	25

Nota: Se visualiza la ponderación realizada de los sensores de nivel. (Calderón y Rivera, 2022)

6.2.6. Diseño del nuevo sistema.

El diseño de la tubería de transportes de fluido tiene una gran importancia en el sistema automático; en el se realizan los montajes de instrumentos y accesorios necesarios; en este apartado se describirán posiciones, cantidad y espacio de trabajo.

Para la propuesta, las tuberías a rediseñar corresponden a: salida de vapor del caldero hacia el distribuidor y posteriormente al intercambiador de calor; también a la entrada de agua al tanque de condensado, donde se modificará el diseño actual para obtener un sistema automático.

Una vez definida las líneas del sistema automático; a continuación, se describe la posición de los instrumentos en la tubería.

■ Caudalímetro

El caudalímetro Proline Promass A300 es un instrumento para medición de flujo de fluidos como vapor y agua con las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 12. Este instrumento usa el principio de medición Coriolis que incluye un sensor y transmisor datos. Según el catálogo proporcionado por la empresa Endress+Hauser,

este instrumento puede montarse de manera lineal como se observa en la figura 13.
(Endress+Hauser, s.f.)

Figura 12

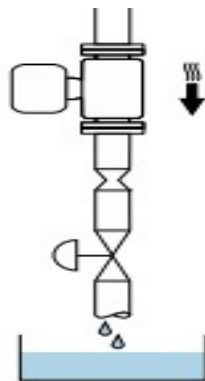
Sensor de flujo Proline Promass A300



Nota: En la figura, se muestra el caudalímetro seleccionado para el diseño del sistema.
(Endress+Hauser, s.f.)

Figura 13

Montaje Proline Promass A300



Nota: Montaje del caudalímetro seleccionado.(Endress+Hauser, s.f.)

■ PMP75

El sensor de presión PMP75, es utilizado para medición de presiones relativas y absolutas en fluidos como vapor, agua y gases con las especificaciones técnicas que se pueden observar en la tabla 13. En este sensor, la presión de trabajo actúa sobre una membrana de proceso del diafragma separador y se transfiere al de aislamiento, donde el líquido

de relleno transfiere la presión a un puente de medición de resistencias donde se mide y procesa la tensión de salida. Según el catálogo proporcionado por la empresa Endress+Hauser, este instrumento puede montarse de manera inclinada o perpendicular a la tubería.(Endress+Hauser, s.f.)

Figura 14

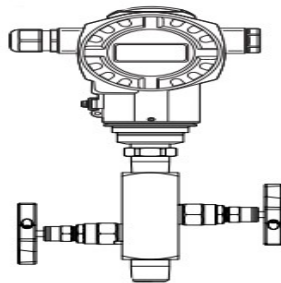
Sensor de presión PMP75



Nota: Se visualiza el sensor de presión seleccionado para el diseño del sistema. (Endress+Hauser, s.f.)

Figura 15

Montaje PMP75



Nota: Montaje del sensor de presión PMP75 seleccionado. (Endress+Hauser, s.f.)

■ **TR15**

El medidor TR15, es un termómetro de resistencia que utiliza un sensor de temperatura Pt100. Las características de este instrumento se encuentran en la tabla 14. Según el catálogo proporcionado por la empresa Endress+Hauser, la posición de la sonda de

temperatura puede darse en todas las posiciones posibles sobre la tubería, es decir no tiene restricciones.(Endress+Hauser, s.f.)

Figura 16

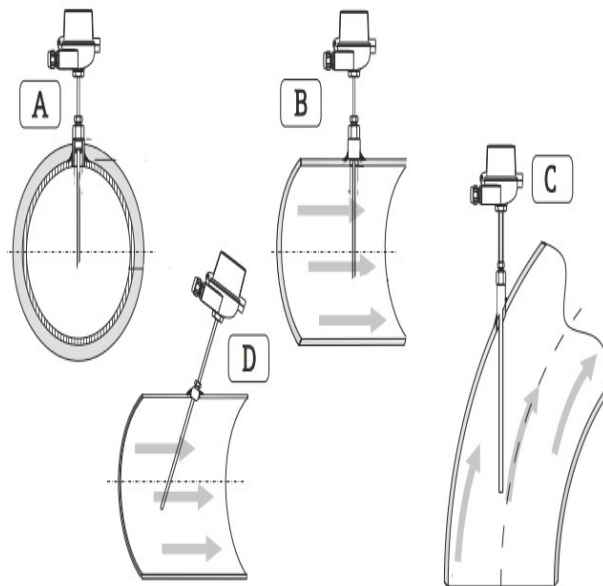
Sensor de temperatura TR15



Nota: Se puede apreciar el sensor de temperatura seleccionado para el diseño del sistema.
(Endress+Hauser, s.f.)

Figura 17

Montaje TR15



Nota: Se muestra un ejemplo del montaje del sensor de temperatura TR15 seleccionado.
(Endress+Hauser, s.f.)

- **Micropilot FMR60**

El medidor de nivel micropilot es un dispositivo de medición orientado hacia abajo, básicamente usa el método de onda continua en frecuencia (FMCW). Sus especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 15. Según el catálogo proporcionado por la empresa Endress+Hauser, la posición de este instrumento es de tipo vertical; es decir, sobre el tanque o recipiente que se desea monitorear. (Endress+Hauser, s.f.)

Figura 18

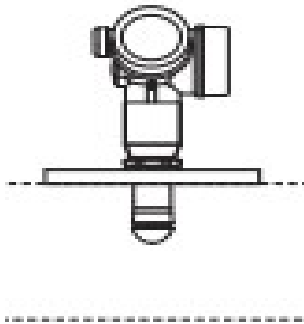
Sensor de nivel Micropilot FMR60



Nota: Se observa el sensor de temperatura seleccionado para el diseño del sistema. (Endress+Hauser, s.f.)

Figura 19

Montaje FMR60



Nota: Montaje del sensor de nivel FMR60 seleccionado. (Endress+Hauser, s.f.)

- **SIPART PS2**

El posicionador electro-neumático, conjuntamente con un actuador forman el sistema de regulación, donde la posición es detectada mediante un servo-potenciómetro y se devuelve como un valor real, el cual se muestra en el display. Según el catálogo de este instrumento, su montaje puede ser horizontal o vertical con la restricción de que en este ultimo no puede darse hacia arriba por la aparición de vacíos internos en la tubería encontrado en la portal web de siemens.

Figura 20

Válvula proporcional SIPART PS2



Nota: Válvula con el posicionador de control seleccionado para el diseño del sistema encontrado en la portal web de siemens

- **Danfoss EV225B**

La electroválvula EV225BB es un instrumento que funciona mediante una fuerza electromagnética donde se pasa una corriente eléctrica a través de la bobina del solenoide, se genera un campo que produce el movimiento, donde su estado es normalmente abierto o cerrado, sus especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 17. Según el catálogo de este instrumento, su montaje puede ser horizontal o vertical. (Dannfoss, s.f.)

Figura 21

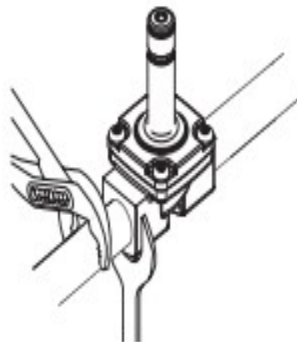
Válvula solenoide EV225B



Nota: En la figura, se encuentra la válvula solenoide con el seleccionado para el diseño del sistema. (Danfoss, s.f.)

Figura 22

Montaje EV225B



Nota: Montaje de la válvula solenoide. (Endress+Hauser, s.f.)

■ Simatic Basic Panel KTP400

El HMI de Siemens KTP400 permite un acoplamiento de proceso con el PLC 17-1200 con programación desde WinCC Basic V13 hasta el actual (TIA Portal).

Figura 23

Interfaz humano - máquina



Nota: Se indica el HMI seleccionado para el diseño del sistema encontrado en la portal web de siemens

Se requieren de accesorios como codos, tee y uniones para el ensamble del diseño propuesto, para lo cuál se hará uso del acero class 150 que por su normativa según ISA permite su uso, para lo cual se presenta en la tabla 26 la lista de accesorios y la cantidad de los mismos considerando que en la planta actual varios de estos serán reutilizados en la nueva tubería. Por consiguiente el nuevo sistema automático también requiere de la inclusión de válvulas manuales de bola para ser ubicadas acorde al diseño propuesto.

Tabla 26

Accesorios.

Accesorio	Tamaño (in)	Cantidad
Codo roscado 90°	1/2	4
Tee	1/2	4
Unión NPT	1/2	2
Unión roscada macho	1/2	4
Valvula de bola	1/2	4

Nota: Cantidad y tipos de accesorios necesarios para el nuevo sistema. (Calderón y Rivera, 2022)

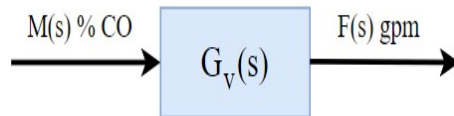
6.2.7. Control PID para válvula proporcional de vapor

Como se mencionó anteriormente se planteó integrar una válvula proporcional para controlar el flujo de salida de vapor, esto con el fin de que a una futura implementación, se lo pueda utilizar como una fuente térmica para: calentamiento de tanques, activación de actuadores, esterilización e superficies, hidratación, etc.

Previo a la obtención del control se procedió a modelar matemáticamente la planta; es decir, el posicionador. En instrumentación los sistemas de primer orden son muy usados, en especial al momento de modelar válvulas, por lo que se hará uso del siguiente modelo con la finalidad de obtener la función de transferencia con ayuda del software matlab, en el anexo C se muestra el código de programación generado.

Figura 24

Sistema de control



Nota: Esquema general de un sistema de control de primer orden. (Calderón y Rivera, 2022)

$$G_v(s) = \frac{F(s)}{M(s)} = \frac{K_v}{T_v \cdot s + 1} \quad (34)$$

Donde:

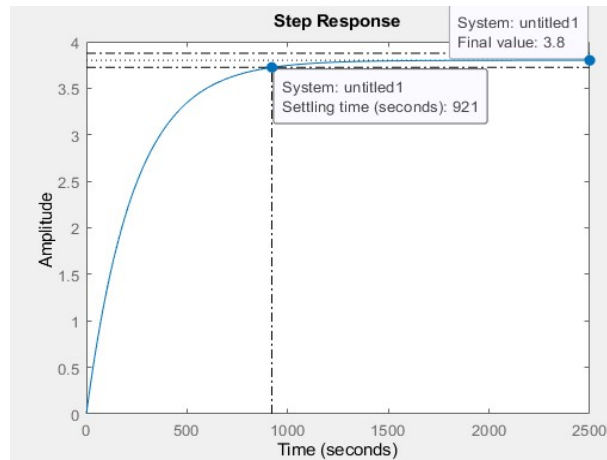
- $\%CO$: Porcentaje de apertura del posicionador.
- K_v : Ganancia de la válvula, gpm/ $\%CO$.
- T_v : Constante de tiempo.

Para reemplazar los valores de K_v y T_v se utilizaron los proporcionados por fabricante, estos se encontraron en la ficha técnica de la válvula. Para $K_v = 0.768$ y $T_v = 235.5$, obteniendo como resultado la siguiente función de transferencia:

$$G_v(s) = \frac{3.8}{(235.1 \cdot s + 1)} \quad (35)$$

Figura 25

Planta sin control



Nota: Se observa la respuesta del sistema sin controlar en el software matlab, el cuál nos da como respuesta un sistema sobre-amortiguado con un $\tau = 921$ s utilizando una entrada respuesta a escalón. (Calderón y Rivera, 2022)

Sin embargo, tanto el tiempo de asentamiento como el error en estado estable simulados no son idóneos para la planta, teniendo como resultado:

$$[T_s]_{simulado} = 921 \text{ s}$$

$$error = 280\%$$

De igual forma se calculo el polo real del sistema para obtener el tiempo de asentamiento calculado.

$$Polo = -0.0042$$

$$T_s = \frac{4}{0.0042} = 952.3 \text{ s.}$$

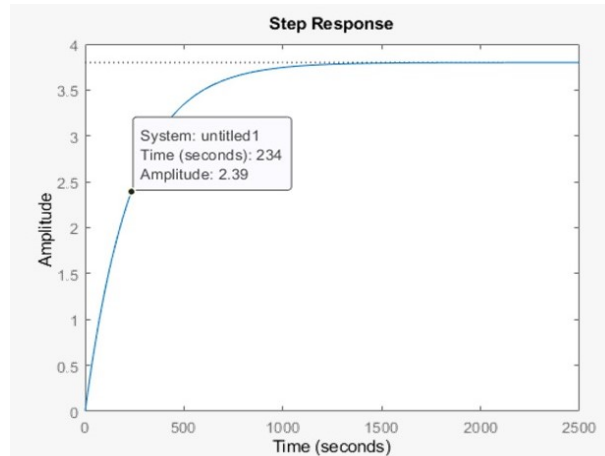
En base a los parámetros de respuesta transitoria del sistema sin controlar se definió las condiciones de diseño del control, para el cual se propuso uno de tipo PID.

- $T_s = 2$ s
- $OS\% = 0\%$; Sobre-amortiguado
- $Error = 0$

Una vez planteadas las condiciones de diseño, se procedió con el cálculo de las ganancias K_p , K_i y K_d de forma que el control brinde una respuesta aproximada a la deseada. Esto se logró mediante el método de Zigler-Nichols, el cual dice que utilizando la respuesta del sistema sin controlar se debe hallar el tiempo τ en el que la amplitud es el 63% del valor final.

Figura 26

Planta sin control



Nota: En la figura, se observa el tiempo $\tau = 234$ s con una ganancia igual a $K = 3.8$ (Calderón y Rivera, 2022)

Una vez obtenidos estos valores se procedió con el cálculo de la ganancia K_p y los valores de τ_i y τ_d con los que se podrán calcular las ganancias K_i y K_d .

$$K_p = 0.9\tau/LK$$

$$K_p = 55.421$$

$$\tau_i = L/0.3$$

$$\tau_i = 3.333$$

$$\tau_d = 0.5L$$

$$\tau_d = 0.5$$

Luego se procedió con el cálculo de las ganancias integral y derivativa del control.

$$K_i = K_p/\tau_i$$

$$K_i = 16.6263$$

$$K_d = K_p \cdot \tau_i$$

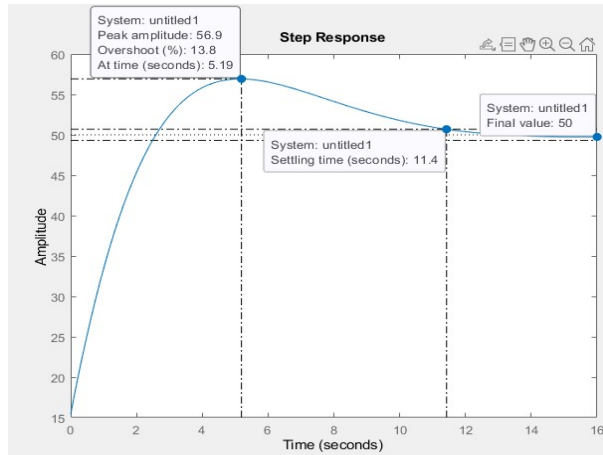
$$K_d = 27.7105$$

Finalmente, se obtuvo las 3 ganancias del control, mediante las cuales se logró definir la función detallada a continuación.

$$55.42 + \frac{16.626}{s} + 27.7105 s \quad (36)$$

Figura 27

Planta con sistema de control de lazo cerrado



Nota: Se presenta la respuesta del sistema con error en estado estable igual a cero del control PID con una referencia de amplitud del 50% de apertura. (Calderón y Rivera, 2022)

Cabe recalcar que se eliminó el error del valor final donde los parámetros de la parte transitoria no son los esperados. La respuesta del sistema es sub-amortiguada con un tiempo de asentamiento igual a 11.4 segundos, con un sobre-disparo de 13.8% a una entrada del 50% de apertura de la válvula..

Para obtener la respuesta deseada se realizó un ajuste de las ganancias de forma experimental, habiendo realizado algunas pruebas se obtuvo los siguientes valores que brindan el resultado deseado.

$$K_p = 170.421$$

$$K_i = 0.662$$

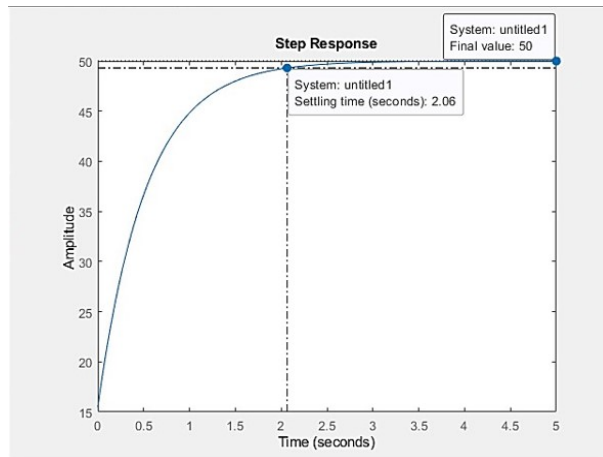
$$K_d = 27.71$$

Con los valores experimentales propuestos se obtuvo la nueva función de transferencia:

$$170.421 + \frac{0.0662}{s} + 27.71 s \quad (37)$$

Figura 28

Respuesta del sistema



Nota: Se puede apreciar la respuesta del sistema controlado en tiempo continuo, de tipo sobre-amortiguado con un tiempo de asentamiento de 2.06 segundos y un error en estado estable igual a 0. (Calderón y Rivera, 2022)

Sin embargo, tanto el sistema como el control se encuentran en tiempo continuo, esto puede producir una saturación de datos. Por lo que se realiza una conversión del sistema a tiempo discreto, para lo cual se calcula el tiempo de muestreo, mediante el criterio de Astrom-Wittenmark. Aplicando el criterio se procedió a simular el diagrama de bode del sistema en lazo abierto, con el que se obtuvo una frecuencia de 3.07 rad/s. Permitiendo el cálculo del intervalo de tiempo de muestreo (T_{min} y T_{max}).

$$W_m = 3.07 \text{ rad/s}$$

$$T_{min} = 0.15/3.07$$

$$T_{max} = 0.5/3.07$$

$$0.0489 < T < 0.1629$$

Una vez calculado el rango de tiempo de muestreo, se selecciona un valor T_x para obtener la función de transferencia en el dominio de Z .

$$T_x = 0.05 \text{ s}$$

$$G_v(z) = \frac{0.0008067}{(z - 0.9998)}$$

Se obtienen las ganancias del control en tiempo discreto.

$$T_i = K_p / K_i$$

$$T_i = 257.4337$$

$$T_d = K_d / K_p$$

$$T_d = 0.1626$$

$$K_z = K_p = 170.421$$

Se calcularon las ganancias en tiempo discreto.

$$KI = \frac{K_z T_x}{T_i}$$

$$KI = 0.00331$$

$$KP = K_z - \frac{KI}{2}$$

$$KP = 170.4046$$

$$KD = \frac{K_z \cdot T_d}{T_x}$$

$$KD = 554.21$$

Al haber calculado las ganancias en tiempo discreto, estas se utilizaron para obtener la función del control como tal en base a la siguiente formula.

$$G_d(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{KP + KI}{(1 - z^{*1}) + KD(1 - z^{*1})} \quad (38)$$

Obteniendo así cada una de sus partes.

Parte proporcional:

$$KP = 170.4046$$

Parte integral:

$$\frac{KI \cdot z}{z - 1}$$

$$\frac{0.0331 \cdot z}{z - 1} \quad (39)$$

Parte derivativa:

$$KD \cdot \frac{z - 1}{z}$$

$$\left(\frac{554.21 \cdot z - 554.21}{z} \right)$$

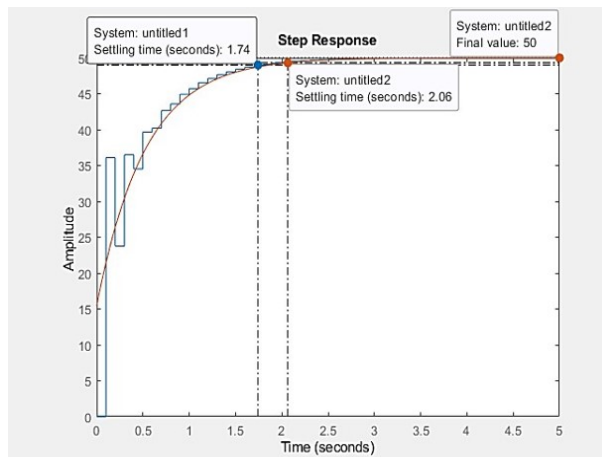
Aplicando álgebra se obtiene la función final del control PID en tiempo discreto.

$$G_d(z) = 170.4046 + \frac{(0.0331 \cdot z)}{z - 1} + \frac{554.21 \cdot z - 554.21}{z}$$

$$G_d(z) = \frac{447.56(z - 1)(z - 0.6194)}{z} \quad (40)$$

Figura 29

Respuesta del sistema en tiempo discreto



Nota: Se presenta la transformación tanto de la planta como el control al dominio Z mediante el software matlab para obtener las respuestas del sistema utilizando los intervalos de cada uno de los métodos de cálculo de tiempo de muestreo para seleccionar el más adecuado. (Calderón y Rivera, 2022)

6.2.8. Simulación del nuevo sistema y distribución

Habiendo realizado el diseño del nuevo sistema automático del caldero se desarrolló la implementación de este en el software LabVIEW para la visualización dinámica y control de la válvula proporcional. Para esto se predetermino el cálculo de la ecuación en diferencia del control.

$$G_{PID(z)} = \frac{X(z)}{E(z)} = \frac{724.65(z)^2 - 1278.934z + 554.284}{z^{(2)} - z} \quad (41)$$

$$(z^2 - z)X_{(z)} = (724.65(z)^2 - 1278.934z + 554.284) \cdot E(Z)$$

$$z^2 X(z) = (724.65z^2 - 1278.934z + 554.284)E(z) + zX_{(z)} \cdot E(Z)$$

$$X(z) = (724.65 - 1278.934z^{(-1)} + 554.284z^{(-2)})E(z) + z^{(-1)}X_{(z)} \cdot E(Z)$$

Usando la transformada de z:

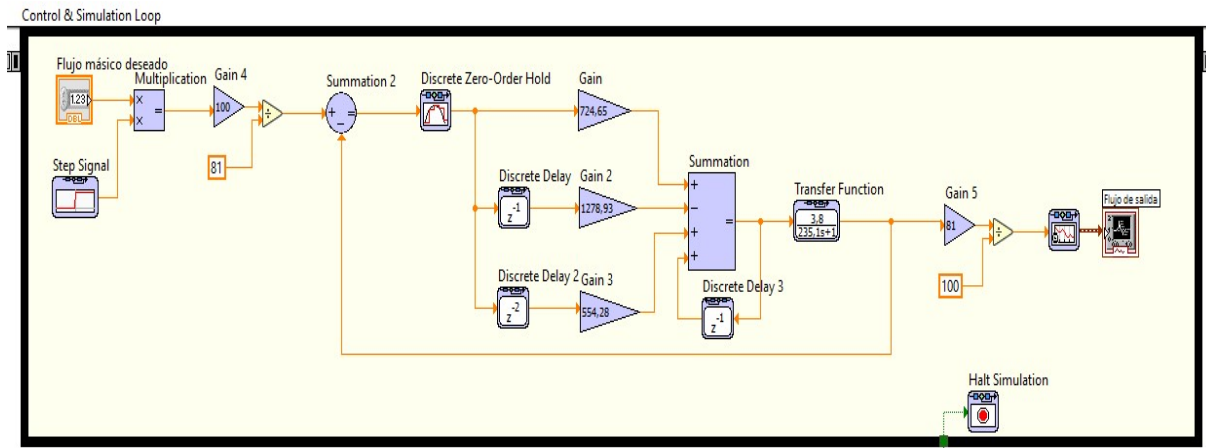
$$Zf(t - nT) = z^{(-n)}F(z) \cdot E(Z) \quad (42)$$

Donde T=tiempo de muestreo.

Mediante la ecuación 42 se procede con la programación en LabView, para lo cual se utiliza la estructura Control and Simulation Loop en la que se programo el control con la ayuda de un bloque retenedor de orden cero y otros que simulan las demoras requeridas. A continuación, en la figura 30 se presenta lo antes mencionado y en el anexo E se muestra el programa completo.

Figura 30

Simulación LabVIEW



Nota: En la figura, se puede observar que se realizan conversiones de flujo a porcentaje de apertura de la válvula y viceversa, ya que el control trabaja con dichos valores. Para esto solo se aplico una regla de tres en cada extremo del arreglo, manteniéndolas fuera de la retroalimentación para que no afecte el resultado. (Calderón y Rivera, 2022)

6.2.9. Costos de mano de obra.

Para la implementación del sistema se requiere de personal apto que instale, adapte y calibre cada uno de los instrumentos adquiridos. Se propone que la instalación sea realizada por estudiantes que la desarrollen como proyecto de titulación, esto en compañía de su docente tutor. De igual manera se cree que se requerirá el soporte técnico de un especialista ya sea del proveedor, de la marca de los instrumentos o un técnico particular dedicado a la realización de este tipo de instalaciones. En base a esto se estima que se requiere del siguiente personal:

- 2 estudiantes: 8 dólares/hora
- Docente tutor: 20 dólares/hora
- Docente co-tutor: 20 dólares/hora
- Técnico especialista: 70-100 dólares/hora

La implementación tendrá un tiempo de duración de 3 meses, con una jornada de trabajo que se presentara a continuación:

- Estudiantes: 4 horas al día.
- Docente tutor: 4 horas semanales.
- Docente co-tutor: 4 horas semanales
- Técnico especialista: 16 horas a lo largo del proyecto.

7. Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en la metodología del proceso y los respectivos análisis según correspondan.

7.1. Parámetros que intervienen en la generación de vapor.

En función de los parámetros iniciales del sistema se obtuvieron los valores de las variables en los que se habilitaran las válvulas para la distribución de vapor, se describen a continuación.

- Volumen de agua contenida en el caldero: 10 gal.
- Presión interna para la apertura de válvulas: 4 bar.
- Temperatura de saturación a 4 bar: 143.6 °C.
- Flujo de salida máximo: 89 kg/h.

Habiendo obtenido la ecuación dinámica del sistema partiendo de los valores antes mencionados, se pudo calcular el tiempo que tarda el agua en pasar de 17 °C a 143.6 °C. Reemplazando este rango de valores de temperatura y los datos calculados anteriormente dio como resultado el siguiente valor de tiempo.

$$\theta = \int_{17}^{143.6} \frac{18.753 \cdot 4186 \cdot dT}{32506368.98}$$

$$\theta = 0.305 \text{ horas} \approx 18.3 \text{ min.}$$

El sistema tarda 18.3 minutos en transferir la energía calorífica deseada hacia el agua contenida internamente en el tanque, la cual es generada por la combustión.

7.2. Diseño de tubería

El material de la tubería del sistema actual cumple con los requerimientos necesarios para la automatización del sistema, por lo cuál se establece hacer uso del mismo con la finalidad de ahorrar costos de implementación y es apta para el montaje de accesorios e instrumentos en el espacio reducido de trabajo con el que cuenta el caldero.

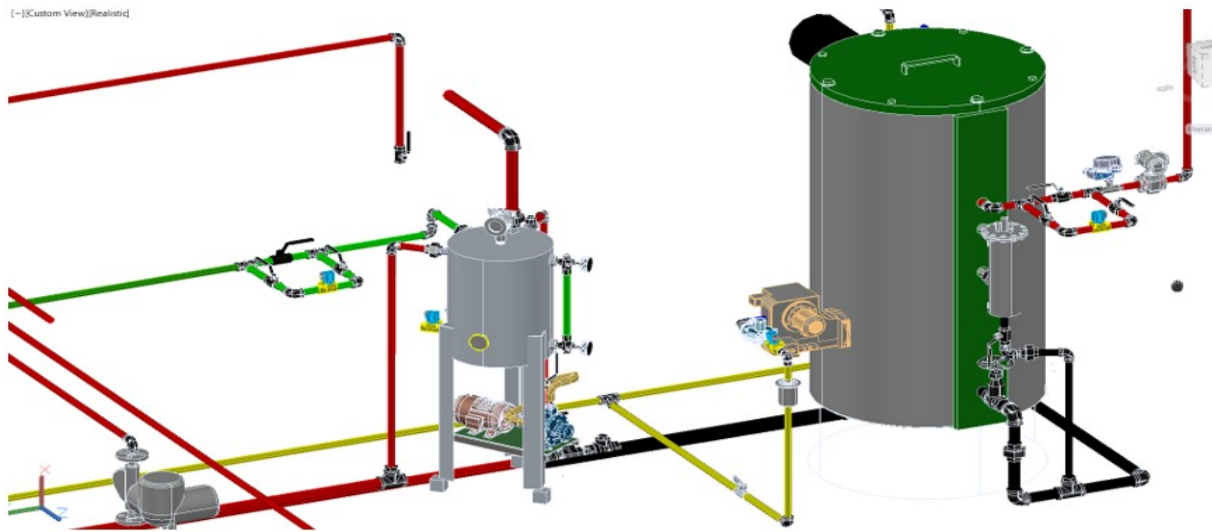
7.2.1. Montaje de tubería

Para establecer el diseño final de la tubería se hizo uso del software Auto CAD 3D PLANT, para lo cual una vez designados los instrumentos, se analizó las distancias, posiciones y posibles montajes permisibles por los fabricantes. Se realiza el modelo 3D de todo el sistema

de generación de vapor que incluye suministro de agua, combustible, tanque de condensado, accesorios entre otros. El anexo D muestra el nuevo diagrama PID de la tubería de vapor propuesta.

Figura 31

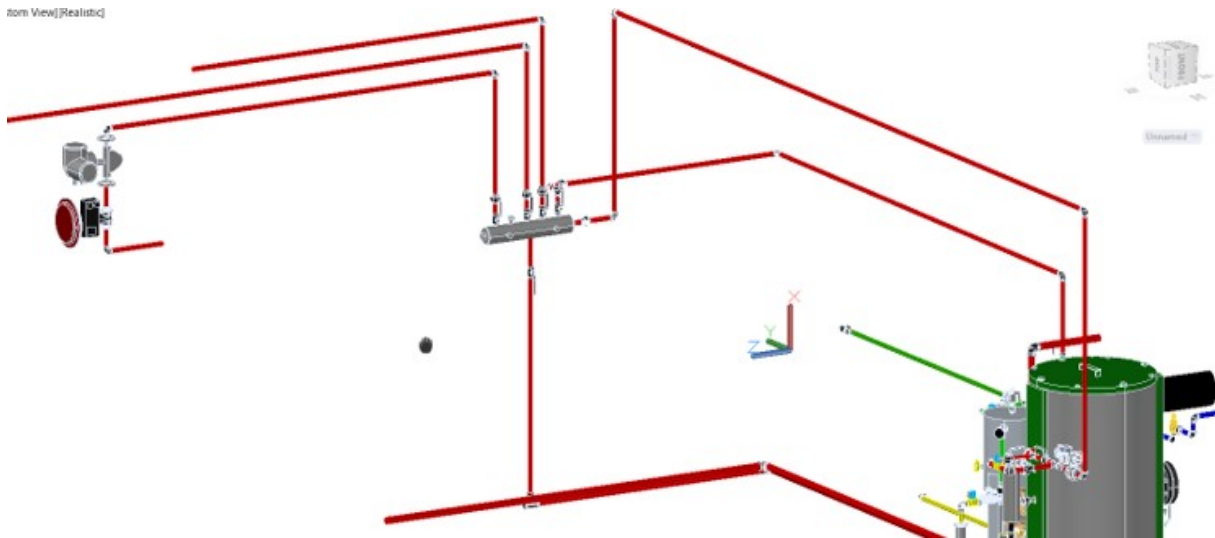
Diseño sistema 3D: Caldero y tanque de condensado



Nota: En la figura, se encuentra la vista frontal del caldero y tanque de condensado, visualizando una parte de los nuevos instrumentos. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 32

Diseño sistema 3D: intercambiador y vías de transporte de fluidos



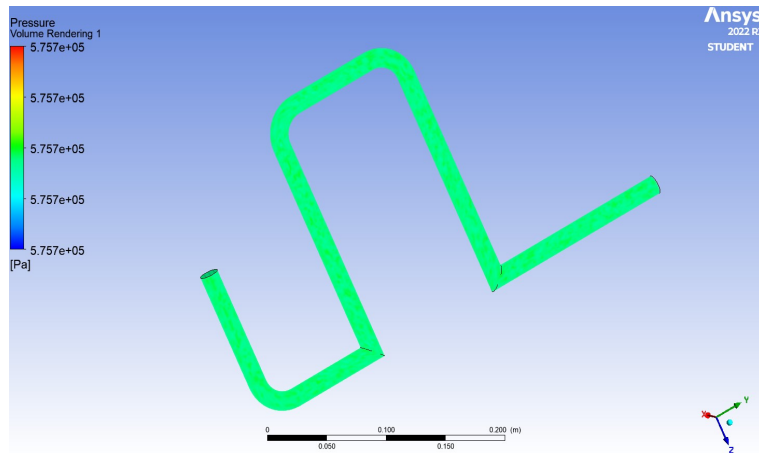
Nota: Se muestra el distribuidor de vapor con las respectivas entradas y salidas, conjuntamente se observa el caudalímetro y válvula proporcional seleccionados. (Calderón y Rivera, 2022)

7.2.2. Comportamiento del fluido en la red de distribución

Para el análisis del comportamiento de vapor dentro de la tubería, se divide esta en 4 partes, con la finalidad de apreciar de mejor manera los datos obtenidos por el software, donde se determinaron pérdidas de presión, variación de temperatura y velocidad de fluido que se presentan. A continuación, se muestra las figuras de transporte de flujo con los resultados correspondientes.

Figura 33

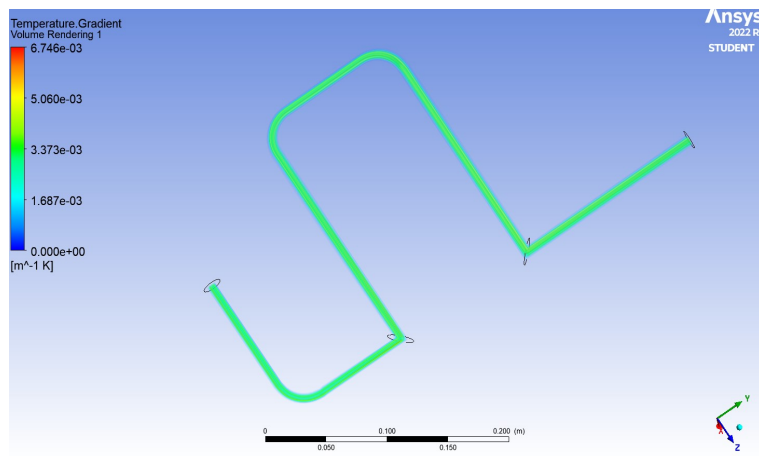
Simulación de presión en Ansys tramo 1.



Nota: Se observa el comportamiento del fluido en función de la presión, en la cual se pierde una unidad de pascal a lo largo de este tramo. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 34

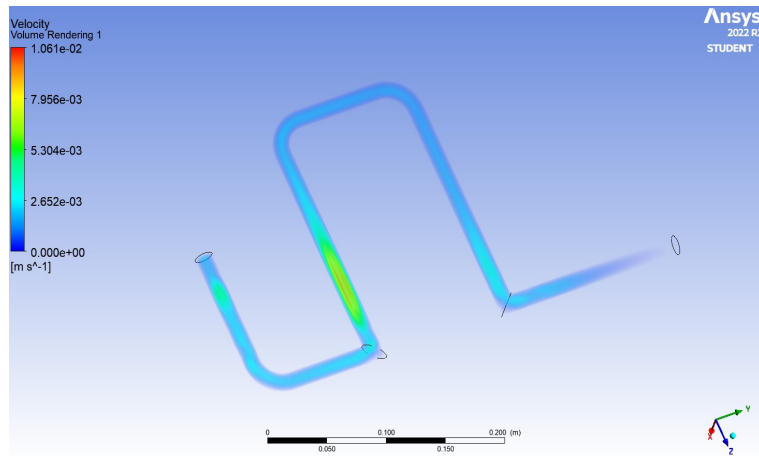
Simulación de temperatura en Ansys tramo 1.



Nota: Se puede observar el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual se pierde 32 grados kelvin a lo largo de este tramo. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 35

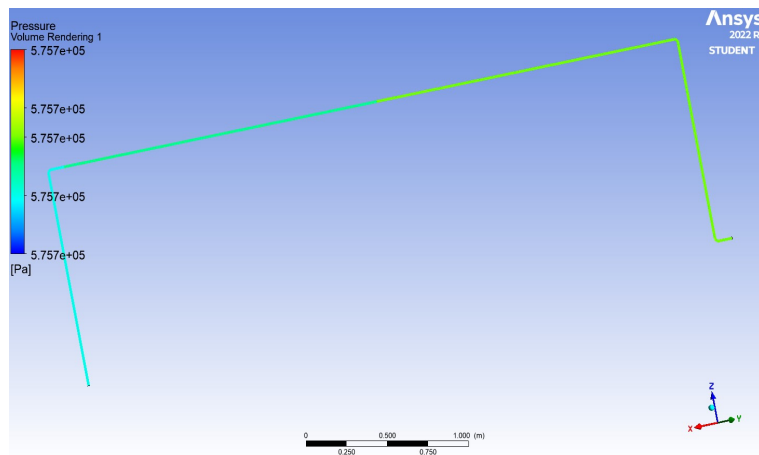
Simulación de Velocidad en Ansys tramo 1.



Nota: Se aprecia el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual las secciones de mayor longitud el fluido adquiere la velocidad máxima de 0.0106 m/s. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 36

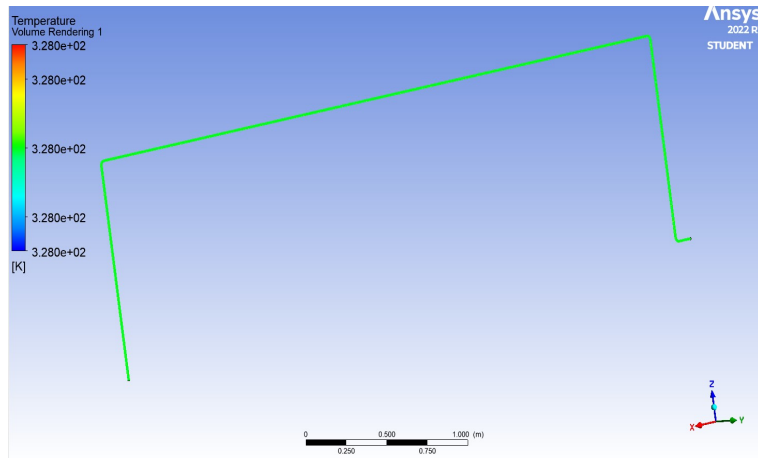
Simulación de presión en Ansys tramo 2.



Nota: Se visualiza el comportamiento del fluido en función de la presión, en la cual no se presentan pérdidas. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 37

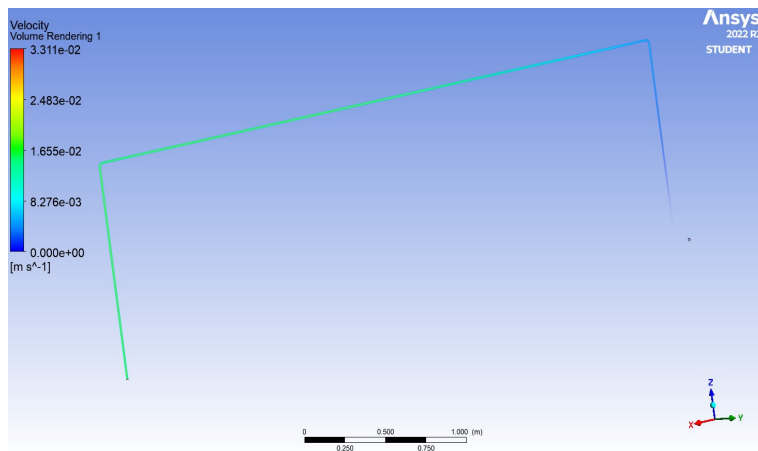
Simulación de temperatura en Ansys tramo 2.



Nota: Se observa el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual no se pierde temperatura, esto debido a las consideraciones de la fibra de vidrio que se encuentra implementada. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 38

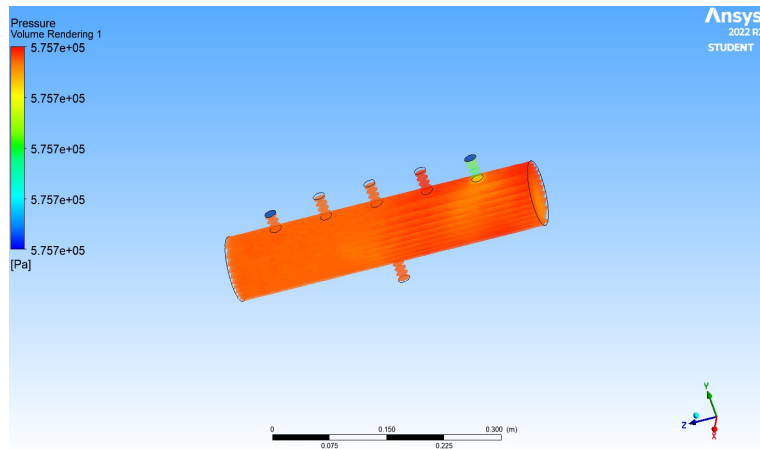
Simulación de Velocidad en Ansys tramo 2.



Nota: En la figura, se aprecia el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual las secciones de mayor longitud el fluido adquiere la velocidad máxima de 0.0331056 m/s. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 39

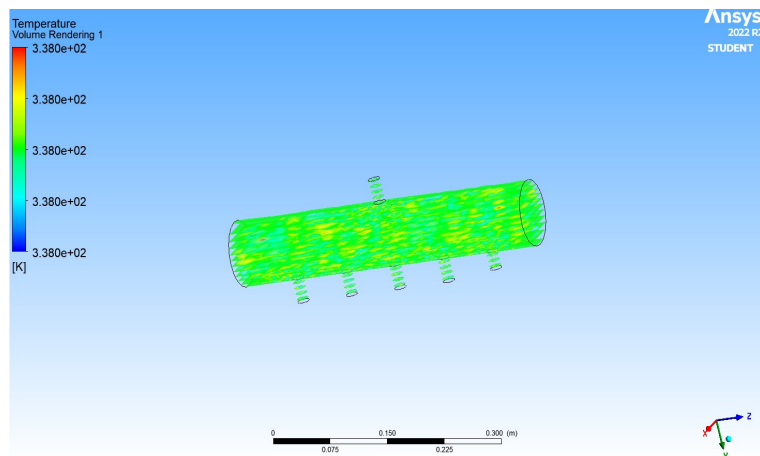
Simulación de presión en Ansys al distribuidor de vapor.



Nota: En la figura, se muestra el comportamiento del fluido en función de la presión, en la cual se puede apreciar unan disminución de 12 Pascales. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 40

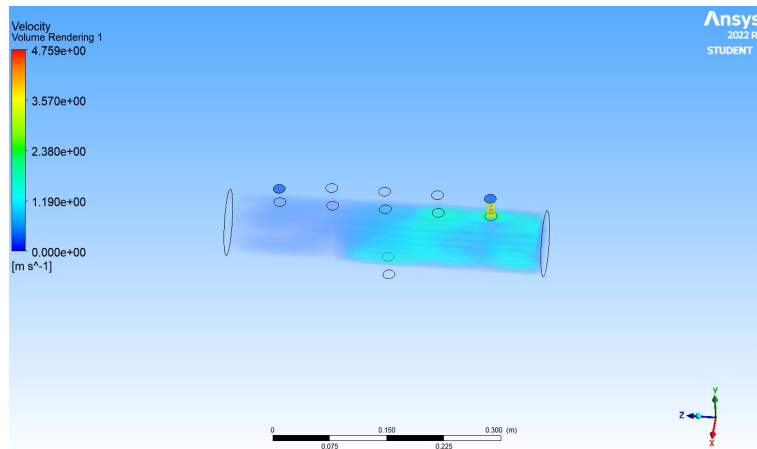
Simulación de temperatura en Ansys al distribuidor de vapor.



Nota: Se observa el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual no existen pérdidas de temperatura. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 41

Simulación de Velocidad en Ansys al distribuidor de vapor.



Nota: En la figura, se puede apreciar el comportamiento del fluido en función de la temperatura, en la cual las secciones de mayor longitud el fluido adquiere la velocidad máxima de 4.759 m/s. (Calderón y Rivera, 2022)

7.3. Parámetros de diseño del sistema automático

Se plantean los parámetros de diseño para el cálculo del control PID para la válvula proporcional de vapor: Tiempo de asentamiento de $T_s = 2s$, respuesta sobre-amortiguada ($OS\% = 0\%$) y error en estado estable igual a cero. Habiendo hecho un ajuste de las ganancias se obtuvo las siguientes.

$$K_P = 170.421$$

$$K_i = 0.662$$

$$K_d = 27.71$$

$$55.42 + 16.626 \cdot \frac{1}{s} + 27.71 \cdot s$$

Para evitar una saturación de adquisición de datos se realizó una conversión de tiempo continuo a tiempo discreto, en el que mediante el criterio de Astrom-Wittenmark, obteniendo un rango de tiempo del que se podía seleccionar un valor como se ve a continuación.

$$0.0489 < T < 0.1629$$

$$T_x = 0.05 \text{ s}$$

Tras realizar una serie de cálculos algebraicos con la ayuda del software Matlab, se llegó tanto a la función de transferencia, ganancias y la función de control PID en el dominio de z .

$$G_v(z) = \frac{0.0008067}{z - 0.9998}$$

$$K_I = 0.0331$$

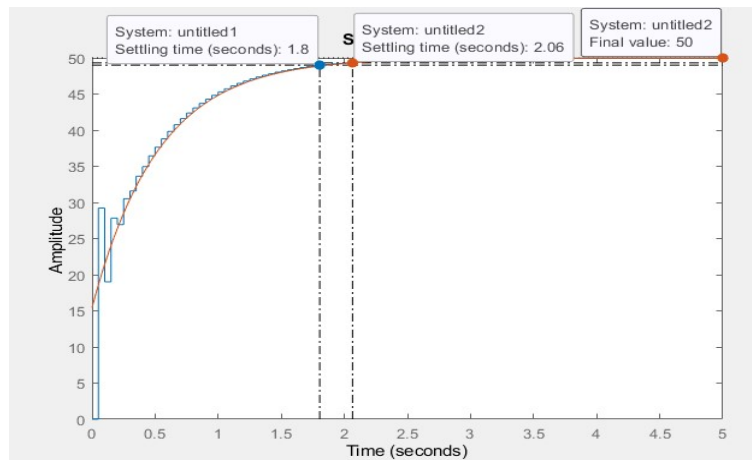
$$K_P = 170.4046$$

$$K_D = 554.21$$

$$G_{PID} = 170.4046 + \frac{0.0331z}{z - 1} + \frac{(554.21z - 554.21)}{z}$$

Figura 42

Respuesta del sistema de control.



Nota: Se observa la respuesta del sistema en lazo cerrado con una referencia del 50%. (Calderón y Rivera, 2022)

$$T_s \text{ Continuo} = 2.06s$$

$$T_s \text{ Discreto} = 1.8s$$

Con los resultados obtenidos, se sabe que dando un adelanto de -0.26 segundo de la respuesta discreta frente a la continua, esta respuesta en estado estable sobre-amortiguada y con error igual a cero.

7.3.1. Resultados de simulación del sistema automático.

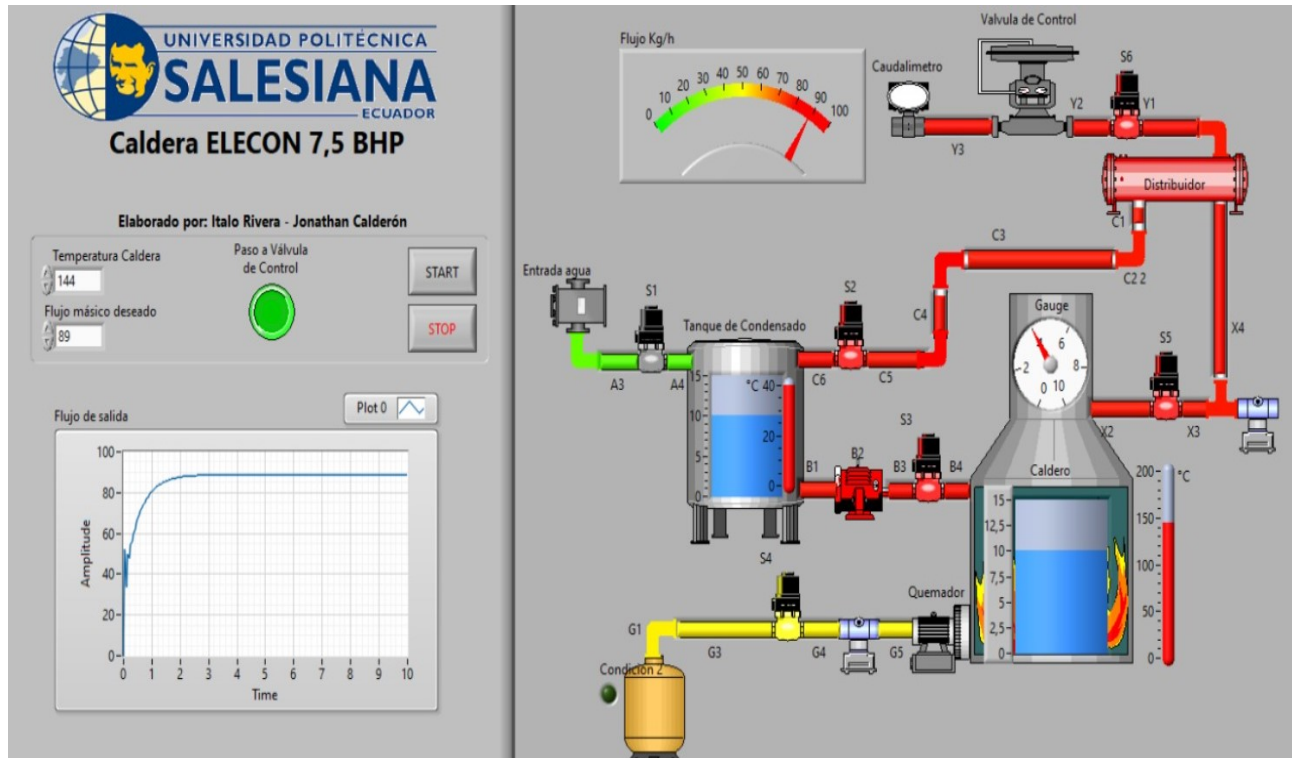
Se implementa en el software Labview una simulación del comportamiento del sistema, en la que también se aplica el control en tiempo discreto para visualizar la respuesta de la válvula frente a cambios de valor referencial. Para poder incluir el control se requiere obtener la ecuación en diferencia del control, resultando la siguiente.

$$x * (t) = 724.65e * (t) - 1278.934e * (t - T) + 554.2848e * (t - 2T) + x * (t - T) \quad (43)$$

En base a la ecuación 43, a continuación se puede observar la planta resultante y la respuesta del control frente a distintas referencias, a las cuales se les aplica una conversión de flujo a porcentaje de apertura de la válvula.

Figura 43

Panel de Control LabVIEW.



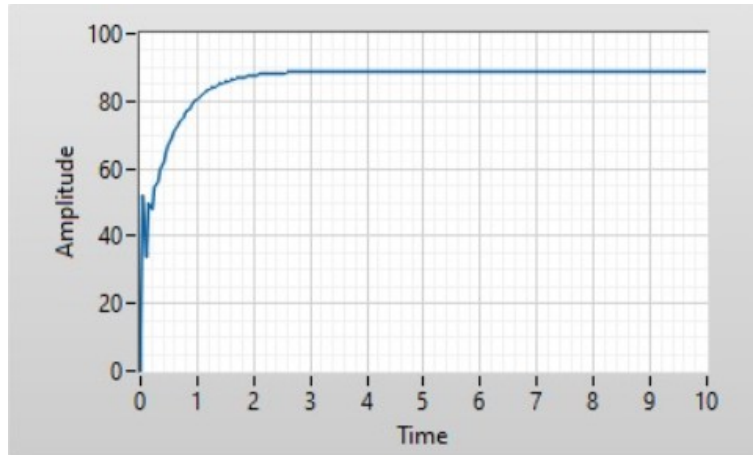
Nota: Se puede observar el comportamiento del sistema en el software LabVIEW con la implementación del módulo DCS módulo. (Calderón y Rivera, 2022)

Para visualizar el programa completo del software Labview ver el anexo E, en el se

encuentran todos los bloques implementados para la simulación del comportamiento del sistema automático.

Figura 44

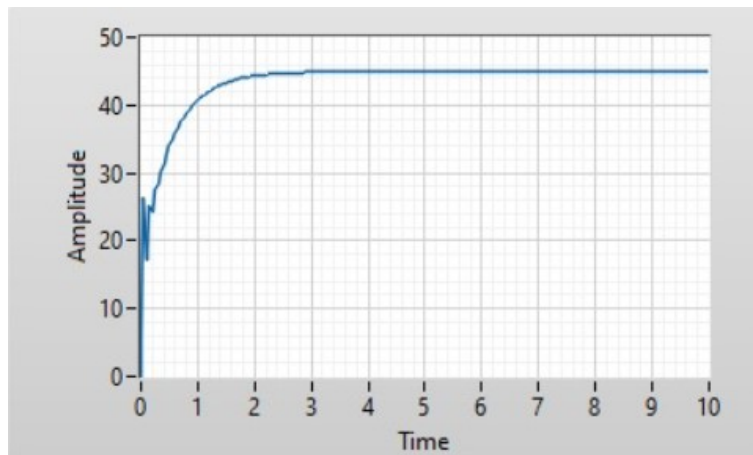
Ejemplo 1: Resultados del sistema de control.



Nota: En la figura, se puede observar el comportamiento del sistema con un valor de referencia de caudal másico igual a 89 Kg/h. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 45

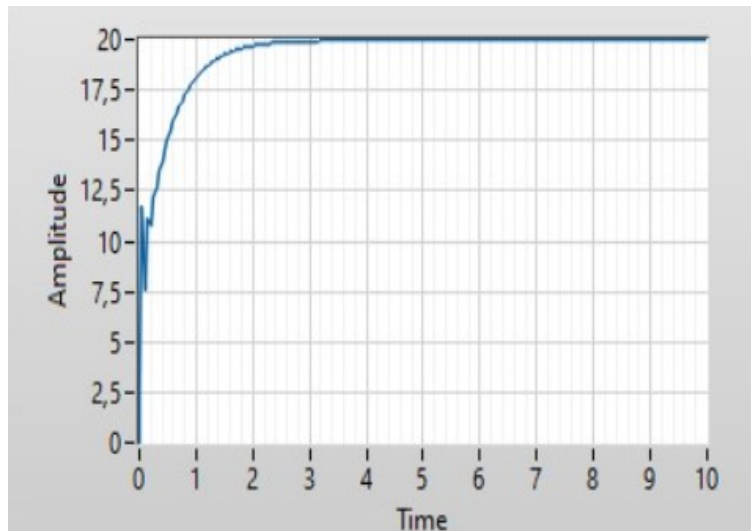
Ejemplo 2: Resultados del sistema de control.



Nota: Se observa el comportamiento del sistema con un valor de referencia de caudal másico igual a 45 Kg/h. (Calderón y Rivera, 2022)

Figura 46

Ejemplo 3: Resultados del sistema de control.



Nota: En la figura, se visualiza el comportamiento del sistema con un valor de referencia de caudal másico igual a 20 Kg/h. (Calderón y Rivera, 2022)

7.3.2. Costos de instrumentos.

En base a la valoración realizada a cada uno de los instrumentos según varios puntos muy importantes, se seleccionó los que se adaptan de mejor manera a los requerimientos planteados. A continuación, en la tabla 27 se presenta los instrumentos elegidos para integrarse en el sistema con sus respectivos costos de adquisición.

Tabla 27*Ponderación Electroválvula.*

Instrumento	Selección	Costo	Cant.
Sensor de flujo tubería	Endress+Hauser: Proline Promass A 300	\$ 3.458,95 \$ 3.458,95	1
Sensores de presión tubería	Endress+Hauser: PMD75	\$ 2.055,42	1
Sensores de temperatura	Endress+Hauser: TR15	\$ 1.456,25	2
Sensor de nivel	Microlot FMR6	\$ 874.55	1
Válvula de control proporcional	Siemens: SIPART PS2	\$ 2.151,00	1
Electroválvula tubería	Danfoss EV225B	\$ 344.51	2
HMI	Siemens: Simatic Basic Panel KTP400	\$ 773,00	1
COSTO TOTAL		\$11113.13	

Nota: Costos de instrumentos y el total para una posible implementación, cabe mencionar que estos pueden variar por diferentes aspectos. (Calderón y Rivera, 2022)

7.3.3. Costos de mano de obra.

En función de la valoración realizada para el costo de mano de obra, se evidencia en la tabla 28 el capital humano, horas de trabajo, valía y coste total; donde el precio del técnico especialista se obtiene mediante la estimación de promedio por hora.

Tabla 28

Costo de mano de obra.

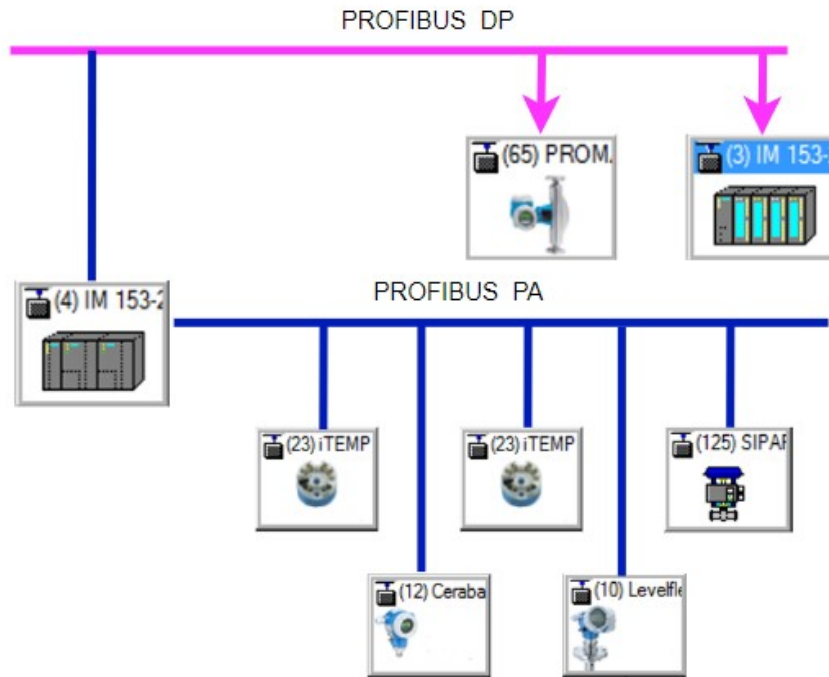
Capital Humano	Horas	Costo hora (\$)	Total (\$)
Estudiante 1	240	8	1920
Estudiante 2	240	8	1920
Tutor	48	20	960
Cotutor	48	20	960
Técnico especialista	16	85	1360
COSTO TOTAL			\$ 7120

Nota: Costos de mano de obra total para implementación del sistema automático. (Calderón y Rivera, 2022)

En cuanto al PLC que se utilizara en el sistema, actualmente se encuentra integrado un Siemens LOGO! 230RC para el control. La universidad cuenta con un PLC de la marca Siemens S7-1200, el cual se plantea utilizarlo para el reemplazo del que se encuentra en la caldera. Esto con la finalidad de utilizar como protocolo de comunicación a Profibus; además de que en el futuro se pueda implementar un sistema IOT conjuntamente con la planta del laboratorio de control y automatización totalmente integrado LACTI. Para esto se tuvo que integrar dentro del diseño un convertidor de profibus a PA. como es el módulo IM153-2, el cual se encuentra disponible en la universidad y servirá para la válvula de control Sipart PS2 y los instrumentos que lo requieran, con la finalidad de lograr una correcta comunicación y transmisión de datos entre los distintos elementos como sensores, actuadores, controlador lógico programable y módulos; estos se presentan en la figura 47.

Figura 47

Comunicación Profibus.



Nota: Se observa la red de distribución PROFIBUS PA y DP. (Calderón y Rivera, 2022)

8. Conclusiones

- El caldero genera vapor a partir de los 18.3 minutos después de haber sido encendido. Esto en función de la presión interna, la cual debe llegar a 4 bares con una temperatura de saturación de 143.6 °C para habilitar la electroválvula de paso. Sabiendo que la potencia real es de 5.68 BHP, con una eficiencia térmica igual a 63.88%.
- En base a las especificaciones técnicas definidas del sistema se realizó la selección de los instrumentos, en su mayoría son de la marca Endress + Hauser. Esto debido a su flexibilidad para adaptarse a distintos tipos de subsistemas. El costo de adquisición de los instrumentos asciende a los \$11113.13 y para una posible implementación el valor de mano de obra ronda por los \$7120 obteniendo un precio total de \$18233.13. El controlador PID diseñado respondió con características aproximadas a las planteadas, con $T_s = 2.08s$ en TC y $T_s = 1.8s$ en TD, siendo una respuesta sobre amortiguada y sin error.
- La documentación generada contiene de forma detallada las especificaciones técnicas bajo las que se recomienda adquirir los instrumentos, así como su montaje y costo. Los planos de disposición de los mismos facilitan la implementación ya que muestran la manera de adaptarse al espacio reducido donde se encuentra el sistema.

9. Recomendaciones

- Generar el plano eléctrico del sistema previo a la implementación, esto en base a los instrumentos que se decidan adquirir según el presupuesto u otras consideraciones futuras.
- Realizar una prueba de Hardware in the Loop del control de flujo de la válvula proporcional previo a la implementación, debido a que se requiere realizar calibraciones de los instrumentos.
- Para la conexión de los instrumentos que se adquieran verificar las que los rangos de trabajo de variables como temperatura y presión estén acordes a lo requerido.
- Verificar que el protocolo de comunicación de los instrumentos sea Profibus PA, ya que el PLC trabaja con este tipo de comunicación para la adquisición de datos.
- Realizar un análisis de soldadura las uniones de las tuberías para evitar posibles fugas, ya que el sistema trabaja temperaturas y presiones altas.
- Cuando se realice la programación del PLC se debe realizar una calibración de los instrumentos acorde se vaya avanzando y dependiendo de los que se adquieran.

Referencias

- Barragan, J. D. (2008). Sistemas robóticos y automáticos. [Disponible en: <https://uhu.es/antonio.barragan/content/caracteristicas-principales>].
- Barrera Puigdollers Cristina, C. G. M., Betoret Valls Noelia, y Édgar, P. E. (2016). Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera.
- Calderas de vapor de tres pasos bosch industrial universal ul-s, ul-sx - industria alimentaria - calderas de vapor de tres pasos. (s.f.). [Disponible en: <https://www.interempresas.net/Alimentaria/FeriaVirtual/Productos-Calderas-de-vapor-de-tres-pasos-Bosch-Industrial-Universal-UL-S-UL-SX-119942.html>].
- Camacho, A., Arenas, A., y Duque, M. (2012). *Diseño en ingeniería: una posible visión para la evaluación*. ACOFI.
- Carballo, J., y Romero, D. (2011). *Tutorial norma isa s5.1 y diagramas p&id*. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Carrillo, J., Polo, A., y Esmeral, M. (2005). *Diseño y construcción de un controlador lógico programable basado en un núcleo reconfigurable*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Chamorro, G. P., y Toro, H. (2015). *Protocolos de comunicación industrial*.
- Creus Sole, A. (1997). *Instrumentación industrial*. Alfaomega.
- Cruz Reyes, G. (2017). *Automatización de estación para remachado de componentes*. Centro de ingeniería y desarrollo industrial.
- Cueva, J. A. (2017). *Diseño y construcción de una caldera de vapor piro tubular vertical para un biorreactor de algas*.
- Dahl-Skog, R. (2012). *Introducción a los controladores lógicos programables (plc)*.
- Danilo, R. C., y Oswaldo, R. S. (2014). *Diseño del sistema de distribución de vapor y selección del caldero para el hospital san juan de dios*.
- Dannfoss. (s.f.). Válvula para vapor.
- DEWESoft. (2020). *¿qué es un sensor y qué hace?*
- Dorf, R. C., y Bishop, D. R. H. (2011). *Modern control systems*. 12va edición.
- Endress+Hauser. (s.f.). Eh. [Disponible en: <https://www.endress.com/en/search?filter.text=sensor%20de%20nivel%20p.fb=true&category=search-products&termOverride=sensor%20de%20nipp&p=2>].
- Gabriel Pando, H. M. S. V., Pedro Mayorca, y Pelaez, A. (2019). *Afectación de variables operativas en el consumo de combustible de una caldera*.
- Gonzáles, M. C. G., y Castaño, L. F. C. (2021). *Instrumentación y control de una caldera*

industrial.

- ISA-5.1, A. (2009). *Símbolos de instrumentación e identificación*. Estándar Nacional Americano.
- Martinez, D. E. O. (2017). Diseño de una caldera de generación de vapor piro tubular de 10 bhp expandible a 25 bhp mediante módulos.
- Martínez., H. (2015). *Módulo didáctico para prácticas de laboratorio con controladores lógicos programables*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Montaner, y Simon. (s.f.). *Diseño de elementos de máquinas*.
- Moreno, E. G. (2020). *Automatización de procesos industriales. robótica y automática*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering*. 7ma edición.
- Ordoñez, R. B. C., y Pullaguari, J. I. L. (2011). Diseño y construcción de un caldero de 7.5 bhp para generación de vapor.
- Peralta, J., Gallegos, C., y Condori, J. (2020). *Instrumentos de control: Actuadores*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Plou, A. (s.f.). Bases de cálculos de tuberías.

ANEXOS

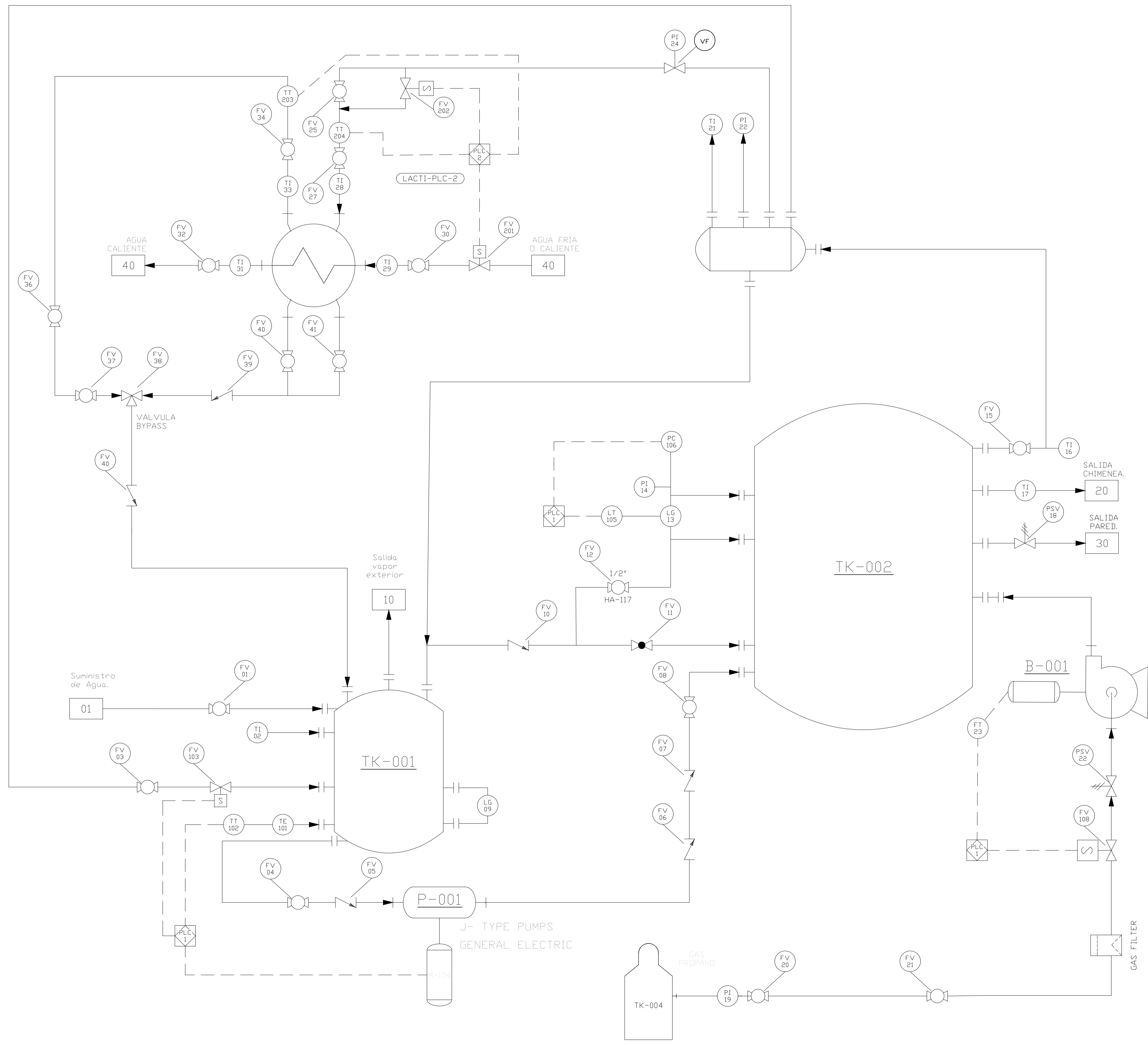
Anexo A: Matriz de consistencia lógica.

DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DEL CALDERO ELECON 7.5 BHP DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es posible diseñar el sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana?	Diseñar el sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se podrá diseñar el sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana.		Diseño Automatización
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS		
¿Se podrá identificar las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.	Identificar las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se identificará las variables de presión, temperatura, nivel y caudal que intervienen en el proceso de generación de vapor del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.	VI: Diseño VD: Control	Diagramas de Instrumentación Sensores y Actuadores.
¿Es factible delimitar los parámetros de diseño del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana?	Delimitar los parámetros de diseño del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se delimitará los parámetros de diseño del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.		Protocolo de comunicación
¿Es idóneo generar documentación para implementación del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana?	Generar la documentación para implementación del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se generará documentación para la implementación del sistema automático para el control del Caldero ELECON 7.5 BHP de la Universidad Politécnica Salesiana.		Documentación.

Fuente: Calderón y Rivera, 2022.

**Anexo B: Diagrama de instrumentación
P&ID del sistema actual.**



Simbología.

	Distribuidor de Vapor		
	Válvula de 3 vías		Tanque de gas
	Tanque		PLC
	Bomba centrífuga		Intercambiador de Calor
	Quemador de gas propano		Filtro de gas
	Válvula de alivio de presión		Válvula selenoide
	Válvula check		Válvula de compuerta
	Válvula de bola		Válvula de globo

PROYECTO: Diseño del sistema Automatizado de control del Caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana

DIBUJADO POR:	Jonathan Calderón & Italo Rivera	Marzo 2022	Ingeniería Mecatrónica	
REVISADO POR:	Ing. Mónica Romero	05-04-2022	SEDE CUENCA	

ISA 5.1 (2009) DIAGRAMA P&ID CALDERO ELECON 7.5 BHP Y TANQUE DE CONDENSADO P&ID Lámina N°1.

Anexo C: Código Matlab, control PID.

```

%%% Parámetros iniciales
Num=[3.8];
Den=[235.5 1]
G=tf(Num,Den)
Ts=feedback(G,1)
pole(G)
%% calculo de ganancias PID
tao=234
K=3.8
kp=(0.9*tao)/K    % Ganancia Proporcional
tao_i=1/0.3
ki=kp/tao_i      % Ganancia integral
tao_d=0.5
kd=kp*tao_d      % Ganancia derivativa
PI=pid(kp,ki,kd) % generacion del PID

%% Ajuste de ganancias
kp=170.4211
ki=0.662
kd=27.7105
PID=pid(kp,ki,kd)
Ts=feedback(G*PID,1)
Flujo=44.5          %gal/min
Apertura=(Flujo*100)/89;
step(Ts*Apertura)  % Respuesta al escalon

%% Criterio de Astorm and Wittenmark
margin(PID*G)      % Verificar wm
Wm=3.07;
Tmin=0.15/Wm
Tmax=0.5/Wm
Tselec=0.05;

%% planta en tiempo discreto
Gz=c2d(G,Tselec,'zoh')

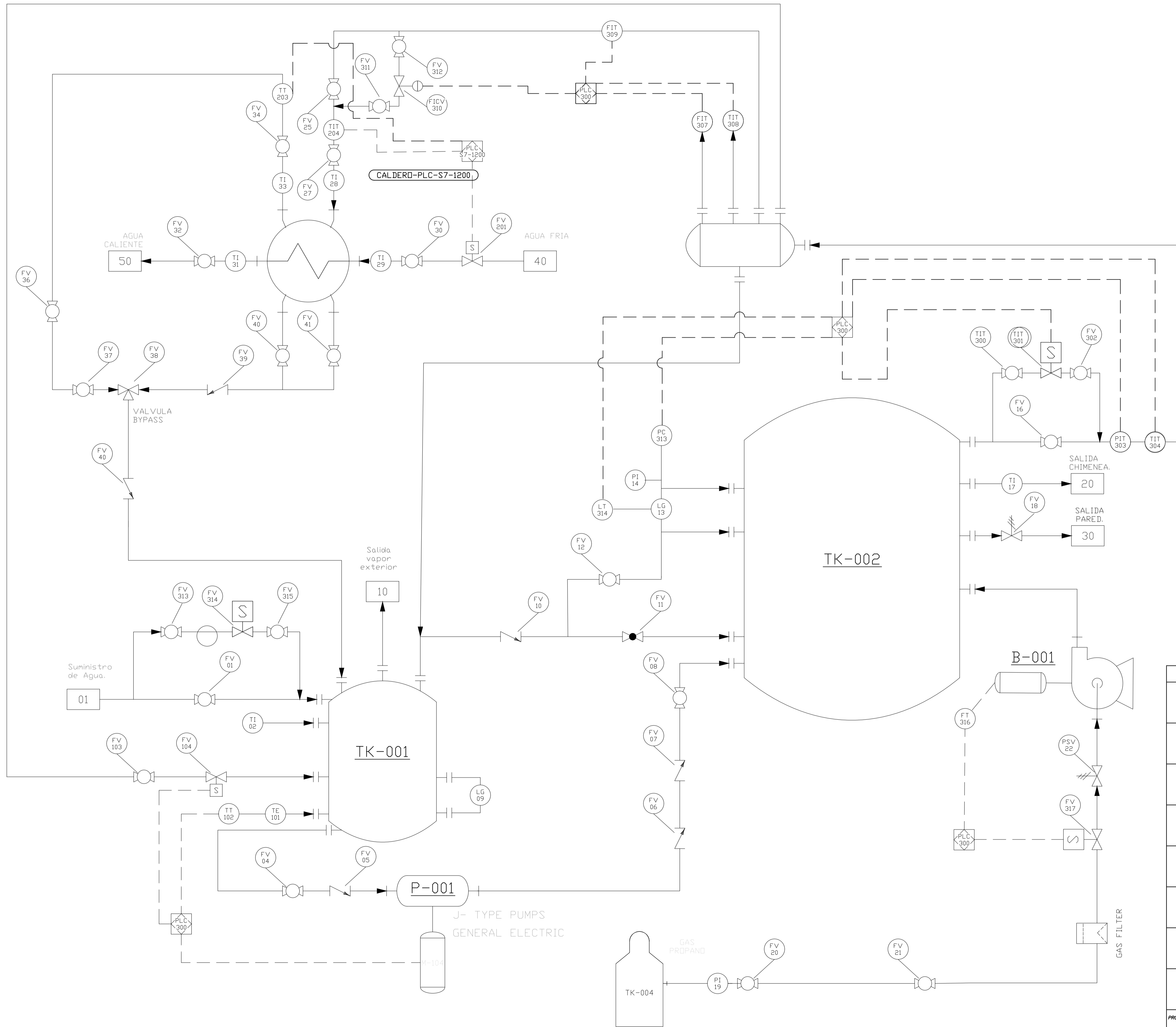
%% PID Discreto
Ti=kp/ki
Td=kd/kp
Kz=kp

KI=Kz*Tselec/Ti
KP=Kz-(KI/2)
KD=Kz*Td/Tselec
%% Controlador en tiempo discreto
Z_1=zpk([1],[0],1,Tselec)
Z_2=zpk([0],[1],1,Tselec)
PID_z=KP+KI*Z_2+KD*Z_1

%% sistema en lazo cerrado
Gz=c2d(G,Tselec,'zoh')
Tz=feedback(Gz*PID_z,1)
Ts=feedback(G*PID,1)
step(Tz*Apertura,Ts*Apertura)

```

Anexo D: Diagrama de instrumentación P&ID del sistema automático.



Simbología.

	Distribuidor de Vapor		Válvula reguladora de caudal
	Válvula de 3 vías		Tanque de gas
	Tanque		PLC
	Bomba centrífuga		Intercambiador de Calor
	Quemador de gas propano		Filtro de gas
	Válvula de alivio de presión		Válvula selenoide
	Válvula check		Válvula de compuerta
	Válvula de bola		Válvula de globo

PROYECTO: **Diseño del sistema Automatizado de control del Caldero ELECON 7.5 BHP del laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad Politécnica Salesiana**

DIBUJADO POR: **Jonathan Calderón & Italo Rivera** Junio 2022 Ingeniería Mecatrónica

REVISADO POR: **Ing. Mónica Romero** 05-07-2022 SEDE CUENCA

ISA 5.1 (2009) **DIAGRAMA P&ID CALDERO ELECON 7.5 BHP Y TANQUE DE CONDENSADO PARA EL SISTEMA AUTOMÁTICO** P&ID Lámina N°2.

Anexo E: Software Labview.

