APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA CALDERA DE PROCESO DE PASTEURIZACION DIDACTICA PARA EL LABORATORIO DE INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS FACULTAD TECNOLOGICA.

CARLOS ANDRES BELTRAN CRUZ

JUAN GUILLERMO POVEDA

DIRECTOR

ING. EDUARDO PORRAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

INGENIERIA EN CONTROL

BOGOTA D.C.

2016

APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA CALDERA DE PROCESO DE PASTEURIZACION DIDACTICA PARA EL LABORATORIO DE INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS FACULTAD TECNOLOGICA.

CARLOS ANDRES BELTRAN CRUZ

JUAN GUILLERMO POVEDA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero en control

Programa:

Ingeniería en control

DIRECTOR

ING. EDUARDO PORRAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

INGENIERIA EN CONTROL

BOGOTA D.C.

2016

HOJA DE ACEPTACIÓN

APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LA CALDERA DE PROCESO DE PASTEURIZACION DIDACTICA PARA EL LABORATORIO DE INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS FACULTAD TECNOLOGICA.

Observaciones.

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director del Proyecto

Ing. Eduardo Porras

_____

ING. Frank Nixon Giraldo

_____

ING. Andres Escobar

Dedicatoria

Andrés Beltrán

Para: Nancy, Estela, Lina y Daniela….

juan guillermo poveda bermudez

para: luz dary, deyci y familiares que hicieron esto posible

Agradecimientos

A nuestras familias, gracias por el apoyo, el cariño y la paciencia

Este logro jamás hubiese sido posible sin ustedes y es en

Definitiva para ustedes que buscamos mejorar cada día

¡Gracias!

A nuestros compañeros Fredy Rivera, Hernán Mancipe, Alejandro López

Y Eliseo Amado. Nuestro más sincero agradecimiento

Por su apoyo y colaboración en la culminación de

Este proyecto

Resumen

El curso de instrumentación de procesos dos del ciclo de ingeniería en control de la sede tecnológica de la universidad Distrital Francisco José de caldas ha venido desarrollando una planta pasteurizadora modular, compuesta por un módulo de dosificación y corrección de PH, un módulo de calentamiento del producto por medio de una caldera e intercambiador de calor y un módulo de enfriamiento.

La caldera junto con un intercambiador de calor tiene limitaciones en su funcionamiento, sin embargo, es capaz de generar vapor de agua a poco más de 42 PSI de presión en un tiempo aproximado de 120 minutos. Esta caldera no cuenta con un sistema de control o sensores que peritan monitorear su funcionamiento, por lo que fue necesaria una reestructuración física y la adaptación de sensores, a fin de lograr hacer el control mediante un PLC (controlador lógico programable) así como la supervisión de su funcionamiento.

Fue necesario hacer una identificación al sistema (caldera-intercambiador de calor) a fin de hallar su función de transferencia y mediante simulación aplicar un método de control a fin de ser aplicado mediante un PLC.

Se pudo identificar experimentalmente algunas características termodinámicas, así como un comportamiento característico de este sistema y gracias a ello se evidencio que es un sistema cuya reacción ante perturbaciones o una señal de referencia es bastante prolongado, por lo que l aplicación de un método de control PID (proporcional, integral, derivativo) es suficiente para controlarlo.

A continuación, se detallará la manera en la que se pudo llevar a cabo el desarrollo de este proyecto y los resultados obtenidos en su aplicación.

Palabras clave: caldera, intercambiador de calor, PLC, características termodinámicas, control PID.

Abstract

The course of process instrumentation 2 cycle engineering control technology headquarters of the University Francisco José de Caldas has developed a modular plant pasteurizer, comprising a dosing module and correction of PH, a module product heating by means of a boiler and heat exchanger and cooling module.

The boiler with a heat exchanger has limitations in performance, however, it is capable of generating steam at just over 42 PSI pressure in approximately 120 minutes. This boiler does not have a control system or sensors that peritan monitor its operation, so a physical restructuring and adaptation of sensors was necessary in order to achieve to control by a PLC (programmable logic controller) and supervision of operation.

It was necessary to make an identification system (boiler-heat exchanger) in order to find its transfer function simulation and by applying a control method to be applied by a PLC.

Could experimentally identify some thermodynamic properties and characteristic behavior of this system and because it was evident that it is a system whose reaction to disturbances or a reference signal is quite long, so I implementation of a control method PID (proportional, integral, derivative) is enough to control it.

The manner in which it was possible to carry out the development of this project and the results of its application detailing.

Keywords: boiler, heat exchanger, PLC, thermodynamic characteristics, PID control.

Tabla de contenido

1 INTRODUCCION 14
2 Planteamiento del problema 15
3 Objetivo General 16
3.1 Objetivos específicos 16
4 marco de referencia 17
4.1 Antecedentes 17
5 Metodología 18
5.1 marco teórico 18
5.1.1 Válvulas de control 18
5.1.1.1 Válvulas de movimiento lineal 18
5.1.1.2 Válvulas de movimiento circular 19
5.1.2 Intercambiadores de calor 22
5.2 Procedimiento 26
5.2.1 construcción de la estructura 26
5.2.2 implementación de los actuadores 28
5.2.2.1 Válvula lineal servo-accionada 29
5.2.3 Implementación de los transductores 31
5.2.3.1 linealización sensor de presión 33
A partir de estas ecuaciones se obtienen la siguiente tabla: 35
5.2.4 implementación de sistema de aislamiento 36
5.2.5 implementación de sistema de alimentación y cableado eléctrico 37
5.2.6 Análisis termodinámico del tanque 39
5.2.6.1 Características del sistema termodinámico 39
5.2.6.2 Procedimiento 40
5.2.6.3 Mediciones Y Cálculos: 40
5.2.6.4 Características de la resistencia 41
5.2.6.5 Datos obtenidos: 41
5.2.6.6 Análisis de resultados: 46
5.2.6.7 Análisis primer estado: 46

5.2.6.8 Análisis segundo estado: 48
5.2.6.9 Primera ley 49
5.2.6.10 Entalpias 50
5.2.6.11 Indicador de nivel 51
5.2.6.12 Simulaciones 52
5.2.7 Identificación y cálculos de parámetros PID 55
5.2.8 Implementación del diseño del controlador PID en el PLC Allen Bradley e interfaz gráfica HMI. 65
5.2.9 Implementación de la supervisión de sobre-presión. 67
5.2.9.1 Paro de Emergencia 68
Implementación de la metodología de automatización por proceso BATCH 70
6 Resultados 74
7 Conclusiones 78
8 Practicas 79
8.1 Practica 1. 79
8.1.1 Puesta en marcha de la caldera. 79
8.2 practica 2 90
Recomendaciones 100
ANEXOS 101

Lista de figuras

Ilustración 1 válvulas de movimiento lineal [3] 19
Ilustración 2 válvulas de movimiento circular [3] 20
Ilustración 3 Curvas características [3] 20
Ilustración 4 Tipos de obturador [3] 21
Ilustración 5 curvas de salida intercambiadores [4] 22
Ilustración 6 intercambiador compacto [4] 23
Ilustración 7 intercambiador de tubos y coraza [4] 23
Ilustración 8 intercambiador de placas y armazón [4] 24
Ilustración 9 intercambiador regenerativo [6] 24
Ilustración 10 condensador térmico [7] 25
Ilustración 11 intercambiador tipo caldera [8] 25
Ilustración 12 plano de la estructura 27
Ilustración 13 estructura sin pintar 27
Ilustración 14 codo para visualizar manómetro verticalmente 28
Ilustración 15 estructura pintada 28
Ilustración 16 resistencia 29
Ilustración 17 bomba de agua 29
Ilustración 18 válvula 30
Ilustración 19 estructura de la electro válvula 31
Ilustración 20 Válvula Terminada 31
Ilustración 21 termocupla 32
Ilustración 22 mirilla de cristal 32
Ilustración 23 sensor de nivel 33
Ilustración 24 sensor de presión 33
Ilustración 25 interpolación sensor de presión 34
Ilustración 26 frescasa 36
Ilustración 27 thermolon 36
Ilustración 28 sistema de aislamiento 37
Ilustración 29 módulo de regulación 5V 37
Ilustración 30 tablero de conexiones 38
Ilustración 31 caldera 39
Ilustración 32 volumen del agua 51
Ilustración 33 termograf estado 1 52
Ilustración 34 termograf estado 2 53
Ilustración 35 datos termograf 53
Ilustración 36 señal inyectada y respuesta 56
Ilustración 37 señal seudo-aleatoria 56
Ilustración 38 señal de salida 57

Ilustración 39 senal de salida tomada de la progracion del PLC 57
Ilustración 40 system identification tool 58
Ilustración 41 Corrección de polos 59
Ilustración 42 Señal simulada 59
Ilustración 43 parámetros matlab 60
Ilustración 44 parámetros matlab 60
Ilustración 45 discretización 61
Ilustración 46 control and estimation 61
Ilustración 47 ajuste de parámetros PID Matlab 62
Ilustración 48 señal de respuesta PID 62
Ilustración 49 Respuesta al sistema con los valores del controlador sin modificar 63
Ilustración 50 Respuesta al sistema con los valores del controlador modificados 63
Ilustración 51 Valores PID del controlador 63
Ilustración 52 diagrama de bloques simulink 64
Ilustración 53 señal de salida simulink 64
Ilustración 54 Esquema de control 65
Ilustración 55 Diagrama de flujo, programación PLC 66
Ilustración 56 Modos de funcionamientos básicos 67
Ilustración 57 Paro de emergencia guía GEMMA 68
Ilustración 58 Señalización paro de emergencia HMI 68
Ilustración 59 Ducto de alivio 69
Ilustración 60 Modelo de proceso del estándar ISA88 70
Ilustración 61 etapa de proceso Inicio 71
Ilustración 62 etapa de proceso llenado de caldera 71
Ilustración 63 etapa de proceso Calentamiento 72
Ilustración 64 etapa de proceso modos de control 72
Ilustración 65 Parámetros automático 73
Ilustración 66 Fin del proceso 73
Ilustración 67 respuesta de caída de temperatura 74
Ilustración 68 respuesta del controlador en HMI 75
Ilustración 69 Constantes del controlador 75
Ilustración 70 grafica con escala ajustada 76
Ilustración 71 main con indicadores de alarmas 76
Ilustración 72 menú datos de sensores con indicadores de alarmas 77
Ilustración 73 plano P&ID para completar 79
Ilustración 74 pantalla de bienvenida 80
Ilustración 75 pantalla de paso 1 80
Ilustración 76 conexión 110V 81
Ilustración 77 conexión 220V 81
Ilustración 78 pantalla paso 2 82
Ilustración 79 válvula de purga cerrada 82

Ilustración 80 pantalla paso 3 83
Ilustración 81 válvula salida de vapor cerrada 83
Ilustración 82 pantalla paso 4 84
Ilustración 83 válvula de alivio abierta 84
Ilustración 84 pantalla paso 5 85
Ilustración 85 pantalla paso 6 86
Ilustración 86 ducto de alivio 86
Ilustración 87 válvula de alivio 87
Ilustración 88 salida de vapor de la válvula hacia dosificación 87
Ilustración 89 conexión salida de vapor caldera - dosificación 88
Ilustración 90 conexión realimentación de agua dosificación - tanque reserva 88
Ilustración 91 manguera realimentación de agua dosificación - tanque de reserva 88
Ilustración 92 Válvula de salida 89
Ilustración 93 abrir simulink 90
Ilustración 94 ventana simulink 90
Ilustración 95 abrir librería 91
Ilustración 96 ventana de la librería 91
Ilustración 97 bloque step 92
Ilustración 98 bloque sum 92
Ilustración 99 bloque PID 93
Ilustración 100 bloque transport delay 93
Ilustración 101 bloque transfer fcn 94
Ilustración 102 bloque scope 94
Ilustración 103 conexión de bloques 95
Ilustración 104 configuración bloque sum 95
Ilustración 105 configuración bloque transfer fcn 96
Ilustración 106 configuración del PID 96
Ilustración 107 respuesta del sistema a los parámetros tuneados 97
Ilustración 108 Menú principal HMI 97
Ilustración 109 Parámetro KP 98
Ilustración 110 Parámetro KI 98
Ilustración 111 Parámetro KD 99

Lista de tablas

Tabla 1 datos sensor de presión 34
Tabla 2 Error sistemático y Bias 35
Tabla 3 Datos medidos 42
Tabla 4 saturación liquido-vapor libro ingeniería termodinámica J.B. Jones 43
Tabla 5 interpolación temperatura respecto a los datos tomados en la práctica de presión con la tabla del libro ingeniería termodinámica J.B. Jones 44
Tabla 6 Error relativo, valor teórico vs práctico 45
Tabla 7 datos análisis primer estado 47
Tabla 8 datos análisis segundo estado 48
Tabla 9 entalpias calculadas con el calor especifico del agua 50
Tabla 10 entalpias determinadas en los estados termodinámicos con ayuda de las tablas 51
Tabla 11 datos recopilados de la experimentación 55

1 INTRODUCCION

Este proyecto tiene el potencial de desarrollarse como una herramienta didáctica en un proceso industrial de pasteurización en su fase de calentamiento de un producto (lácteos, jugos o cualquier producto a pasteurizar). A diferencia de otros proyectos realizados en la sede tecnológica de la universidad distrital como: diseño e implementación de un control de temperatura para la plataforma didáctica de procesos térmicos del grupo de investigación integra.[1] Desarrollo e implementación de un control y supervisión para la planta térmica AMATROL configurado desde el PLC S7-300 del laboratorio de electrónica.[2] Este proyecto pretende enfocar su funcionamiento a un proceso industrial, cuyo principal objetivo es aplicar un sistema de control y supervisión de tal modo que pueda apuntar a ser una herramienta didáctica para el programa de ingeniería en control. Este sistema involucra áreas del conocimiento como termodinámica control e instrumentación entre otras, por lo que podría brindar a la comunidad académica una oportunidad para aplicar o demostrar diferentes conceptos implementados en ambientes industriales.

A continuación, se especificará cada uno de los apartes que llevaron a la realización de este proyecto, desde la adecuación y reestructuración de la planta física, pasando por la identificación y simulación llevando finalmente a la implementación de un sistema de control y supervisión del sistema.

[1] C. Guiza Saavedra y R.A. Bernal Velásquez, << Desarrollo e implementación de un control y supervisión para la planta térmica AMATROL configurado desde el PLC S7-300 del laboratorio de electrónica>>, Bogotá, 2014

[2] V.J. Molina Pinzón Y J.W. Rodríguez Maldonado,<< diseño e implementación de un control de temperatura para la plataforma didáctica de procesos térmicos del grupo de investigación integra>> Bogotá, 2014

2 Planteamiento del problema

Durante tres semestres en el curso de instrumentación de procesos dos del ciclo de ingeniería en control de la sede tecnológica de la universidad Distrital Francisco José de caldas se ha venido desarrollando una planta pasteurizadora modular, compuesta por un módulo de dosificación y corrección de PH, un módulo de calentamiento del producto por medio de una caldera en intercambiador de calor y un módulo de enfriamiento del producto.

La caldera a intervenir tiene limitaciones en cuanto a su funcionamiento, sin embargo, es capaz de generar vapor de agua a poco más de 42 PSI de presión en un tiempo estimado de 120 minutos aproximadamente. Posee un manómetro e indicador de nivel análogo los cuales indican la presión de la caldera y la altura del agua respectivamente. El llenado de la caldera con agua se hace manualmente y aun no tiene un sistema de recirculación del vapor. Carece de sensores digitales o actuadores que le permitan a un controlador manipular el proceso y la supervisión del mismo se realiza de manera visual. No cuenta con ningún tipo de interfaz o control autónomo de regulación del proceso.

La necesidad de dar soluciones a estos y otros problemas quizá no contemplados se hace evidente, la implementación de un sistema de control y supervisión, automatizando el proceso e incorporando elementos que permitan dicho control.

3 Objetivo General

Implementar un sistema de control y supervisión para la caldera de la planta pasteurizadora didáctica ubicada en el laboratorio de industrial de la facultad tecnológica.

3.1 Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones actuales de la caldera a fin de definir el tipo de sensores y actuadores a utilizar, acoplando los sensores y actuadores que permitan hacer el control y supervisión del proceso.

- Comprobar experimentalmente el comportamiento de la caldera a fin de determinar sus características termodinámicas y verificar mediante simulación la respuesta del control PID en el proceso de intercambio de calor.

- Implementar el método de control PID en un PLC y la supervisión en el HMI.

- Diseñar dos prácticas de laboratorio donde los estudiantes se familiaricen con el uso de la caldera.

4 marco de referencia

4.1 Antecedentes

Varios trabajos realizados con anterioridad en el grupo de investigación integra de la universidad distrital francisco José de caldas han servido como base para desarrollar este proyecto, debido a que estos trabajos se han efectuado sobre sistemas térmicos didácticos aplicando control y sistemas de supervisión HMI (interfaz humano máquina).

Para el proyecto es importante conocer el comportamiento del sistema. Un procedimiento de identificación de la planta (compuesta por caldera e intercambiador de calor) permite conocer algunas propiedades características al construir un modelo matemático que la defina. Usando como referencia los proyectos “desarrollo e implementación de control y supervisión para la planta térmica AMATROL configurado desde el PLC S7-300 del laboratorio de electrónica” [1] y “diseño e implementación de un control de temperatura para la plataforma didáctica de procesos térmicos del grupo de investigación integra” [2], fue posible hacerse una idea de los modelos y procedimientos para llevar a cabo el experimento que diera lugar a la identificación de un sistema térmico.

En cuanto a los sistemas de control y supervisión el software de Rockwell Automation compatible con el PLC Allen-Bratley

5 Metodología
5.1 marco teórico
5.1.1 Válvulas de control
La válvula de control es el elemento final más utilizado en los sistemas de regulación de los procesos industriales, jugando un papel fundamental en el lazo de control.

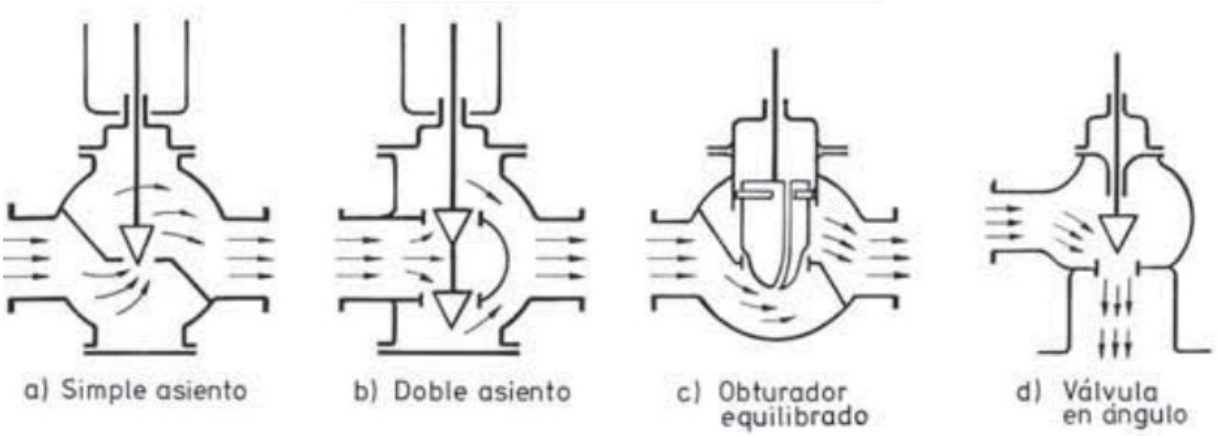
La selección, por tanto, del tipo adecuado de válvula para una tarea específica, basada en la naturaleza del control requerido, así como en las condiciones bajo las cuales tiene que funcionar, es una tarea que exige un análisis y un conocimiento detallado de la tecnología existente.

En el control automático de los procesos industriales, la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica, a su vez, el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. [3]

En nuestro caso la válvula (ver tema construcción válvula) se desarrolló de forma que cumpliera con los requerimientos del proyecto y estuviera acorde con el presupuesto manejado, según la respuesta la válvula a utilizar es de tipo lineal.

Las válvulas se clasifican básicamente según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. Siendo estas: válvulas con obturador de movimiento lineal y válvulas con obturador de movimiento rotativo.

5.1.1.1 Válvulas de movimiento lineal



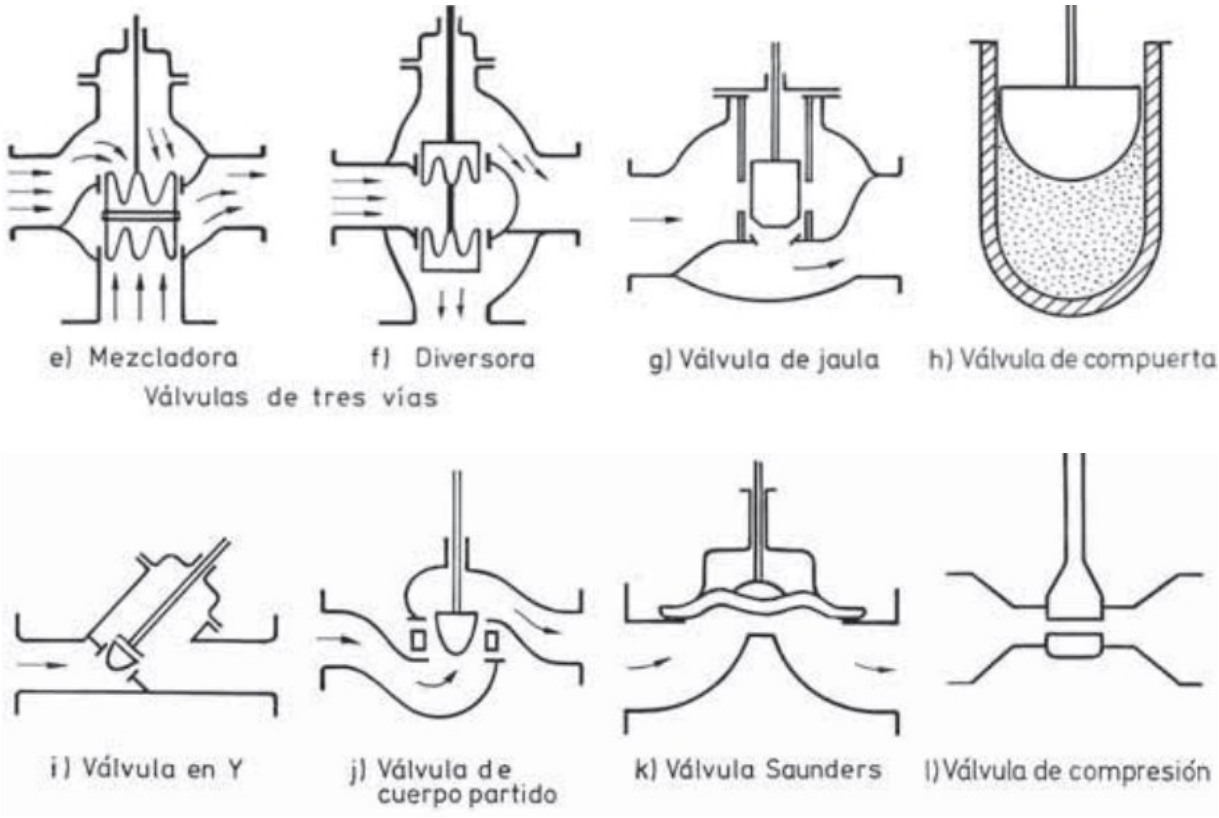
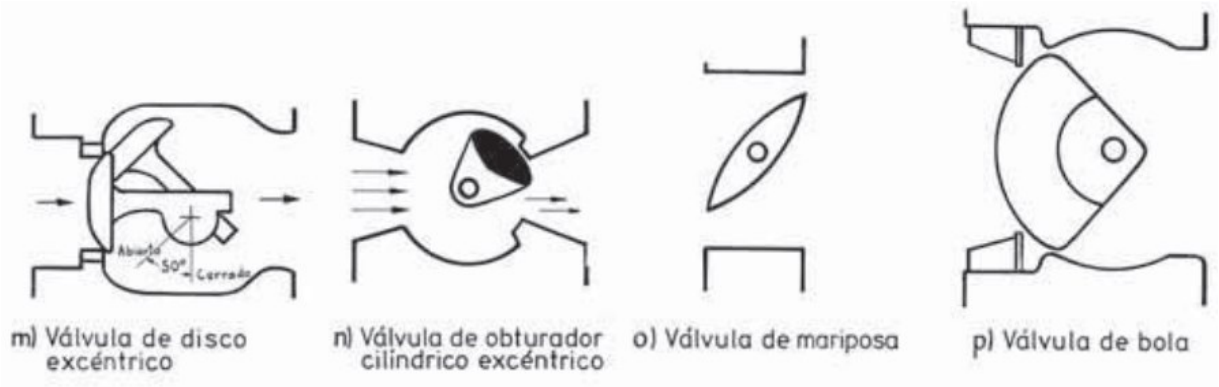


Ilustración 1 válvulas de movimiento lineal [3]

5.1.1.2 Válvulas de movimiento circular



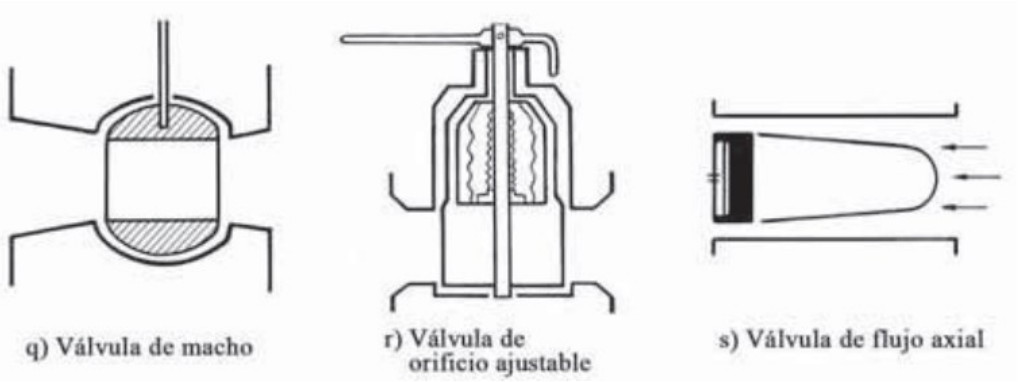


Ilustración 2 válvulas de movimiento circular [3]

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina característica de caudal inherente y se representa, usualmente, considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y, como ordenadas, el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

Las curvas características más significativas son: apertura rápida, lineal e isoporcentual. [3]

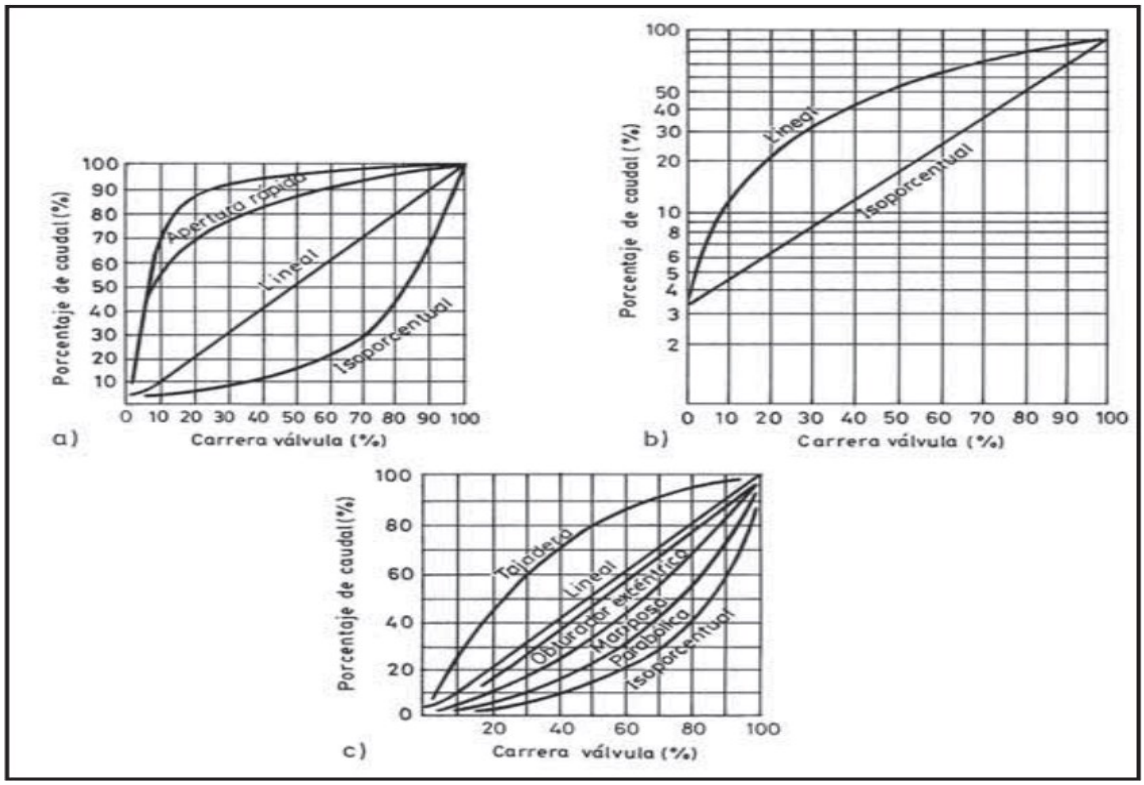


Ilustración 3 Curvas características [3]

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que, al variar la carrera, el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En la figura 4 pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determinan esta característica.

Según las curvas características nuestra válvula es de tipo lineal, En el obturador con característica lineal, En el obturador con característica lineal (figuras 4b, 4f, 4g, 4i), el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

$$q = K * l \qquad (1)$$

En la que:

q = caudal a perdida de carga constante
K = constante
l = carrera de la válvula

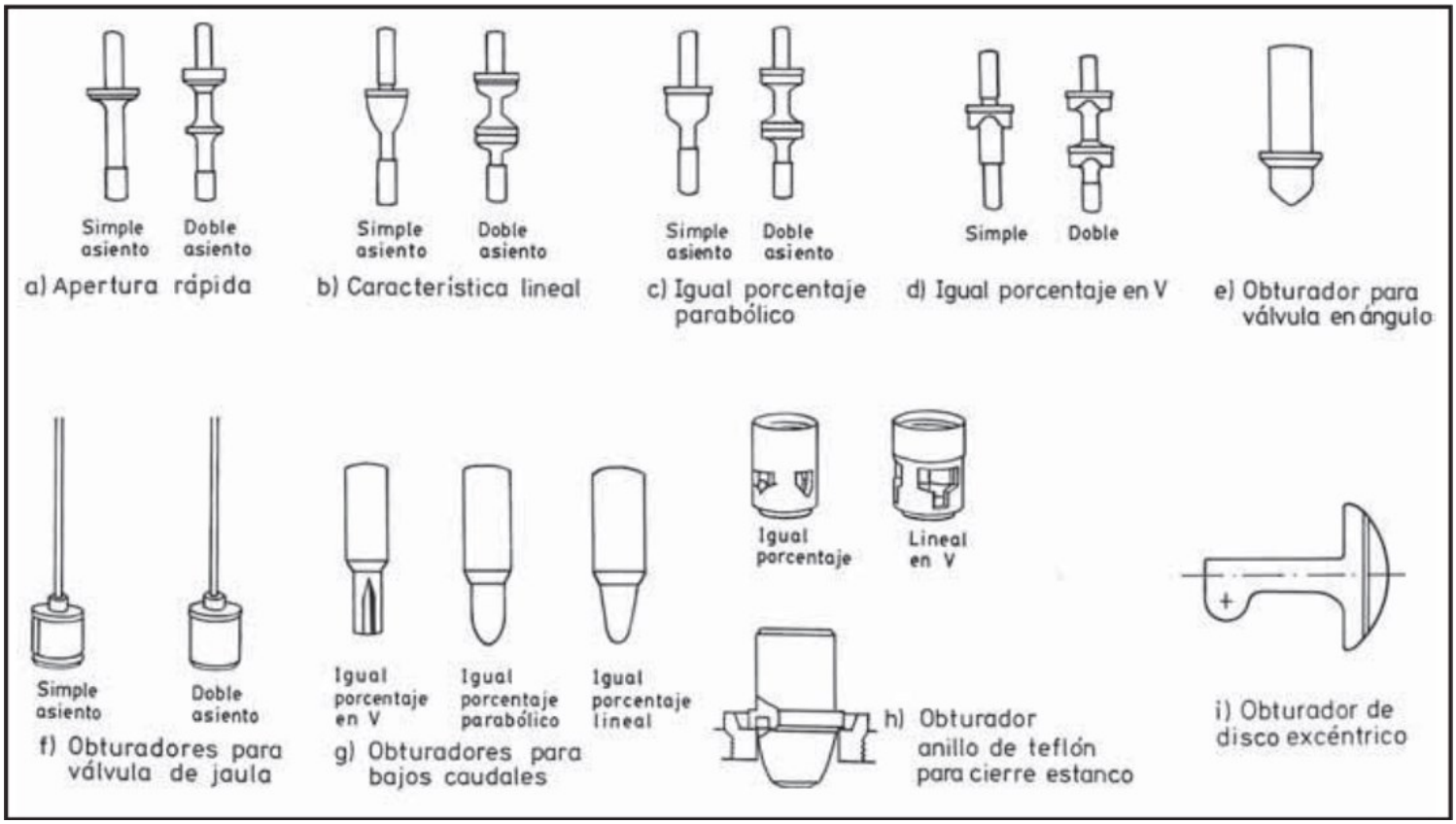


Ilustración 4 Tipos de obturador [3]

5.1.2 Intercambiadores de calor

Entre los tipos de intercambiadores de calor esta:

- Intercambiador de calor de doble tubo

  En un intercambiador de este tipo uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos

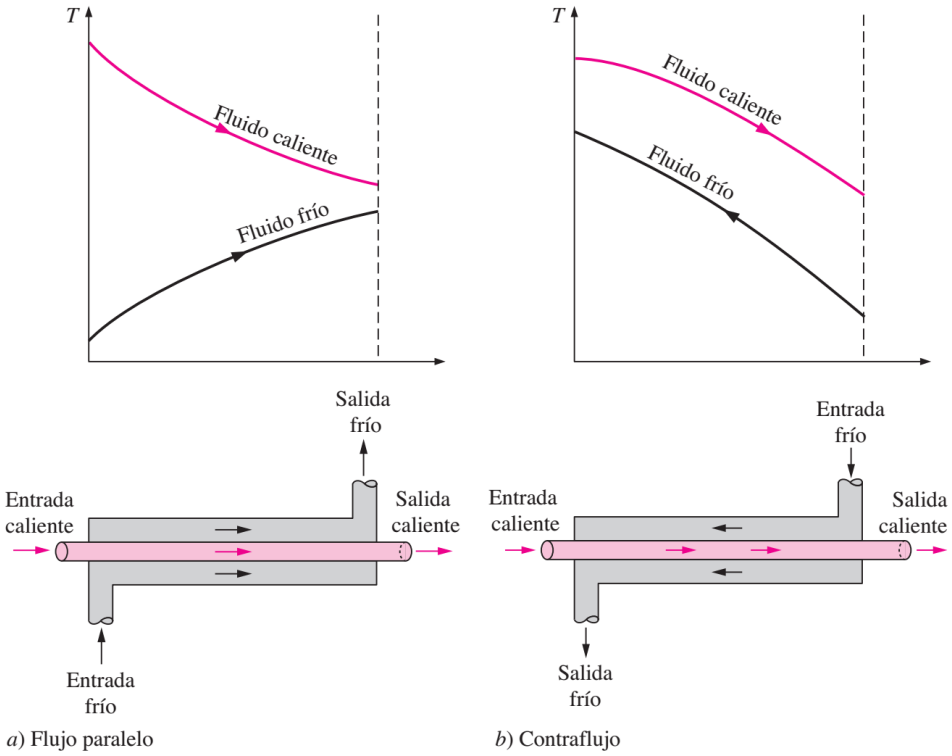


Ilustración 5 curvas de salida intercambiadores [4]

- Compacto

  diseñado específicamente para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen.

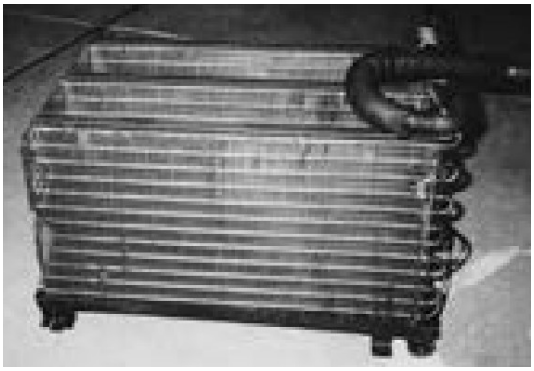


Ilustración 6 intercambiador compacto [4]

- Tubos y coraza

  Estos intercambiadores de calor contienen un gran número de tubos (a veces varios cientos) empacados en una carcasa con sus ejes paralelos al de éste.

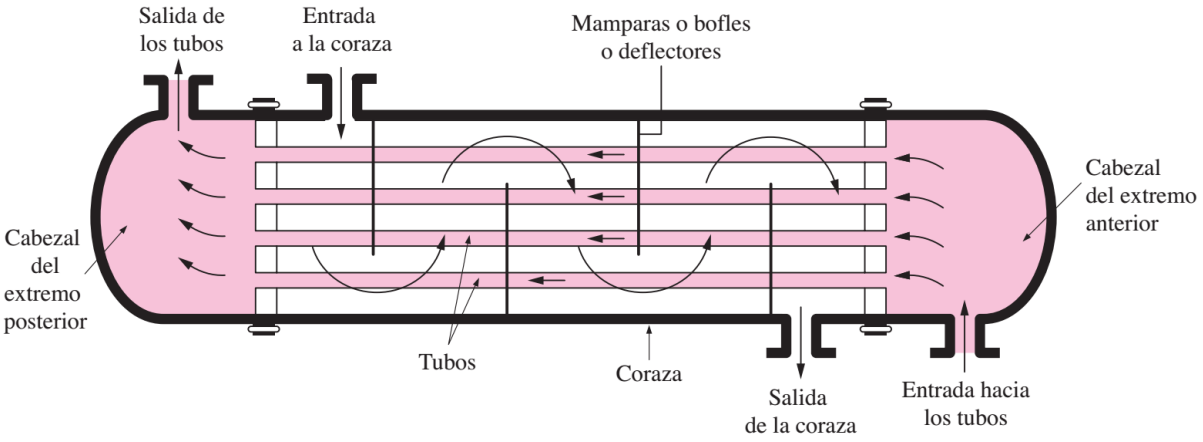


Ilustración 7 intercambiador de tubos y coraza [4]

- Placas y armazón

  consta de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados para el flujo.

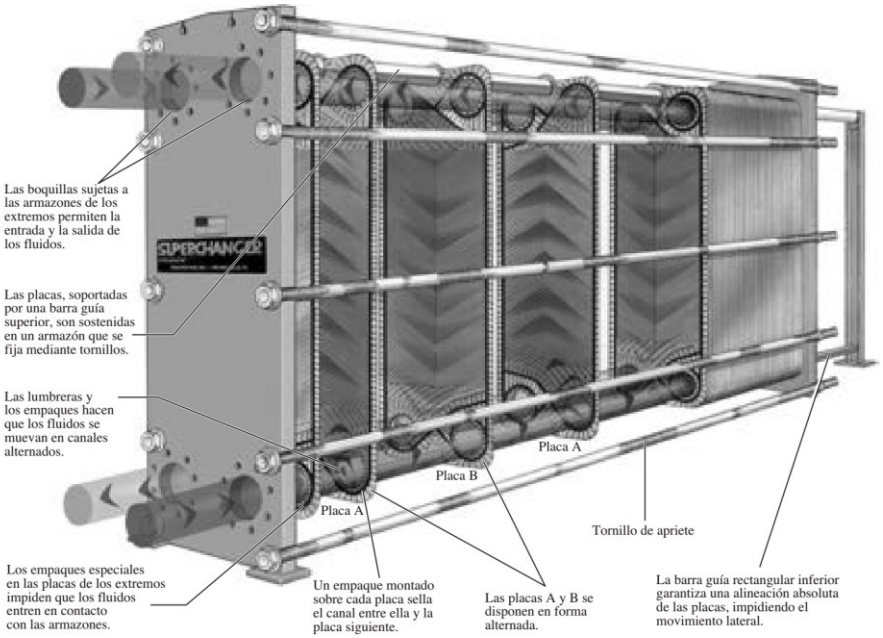


Ilustración 8 intercambiador de placas y armazón [4]

- Regenerativo

  El intercambiador regenerativo del tipo estático básicamente es una masa porosa que tiene una gran capacidad de almacenamiento de calor, como la malla de alambre de cerámica.

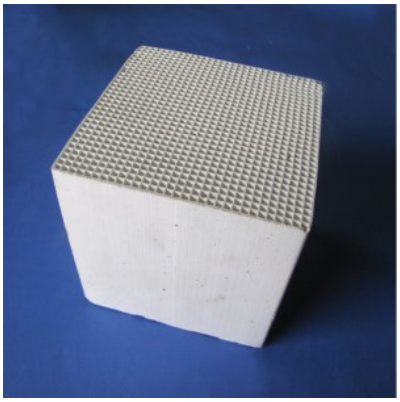


Ilustración 9 intercambiador regenerativo [6]

- Cuando están destinados a una aplicación específica se encuentran, por ejemplo:

- Condensadores

Un condensador es un intercambiador térmico, en cual se pretende que el fluido que lo recorre cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio. [5]

Para la caldera se utiliza un condensador térmico que aprovechara la cesión de calor para precalentar el agua que se inyectara al tanque evaporador, esto con el fin de optimizar energía.



Ilustración 10 condensador térmico [7]

- calderas

  dispositivo en el cual se genera vapor a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.



Ilustración 11 intercambiador tipo caldera [8]

5.2 Procedimiento

5.2.1 construcción de la estructura

El proyecto se inició con la implementación en clase de instrumentación industrial del desarrollo una planta pasteurizadora, la cual consta de tres proyectos o etapas señalados como:

- ❖ Etapa de dosificación
- ❖ Etapa de caldera
- ❖ Etapa de refrigeración

La puesta en marcha del proyecto se inició con la consecución materiales por parte de los estudiantes de la asignatura teniendo en cuenta un tanque con los espacios necesarios para:

- Entrada del agua
- Salida del vapor
- Posición de la resistencia
- Espacios para los sensores
- Espacio del manómetro
- Válvula de alivio de presión

Lo que se desea es entregar una presión de salida de vapor aproximada a 40PSI y así el calentamiento de la caldera del intercambiador pueda elevar su temperatura con facilidad teniendo en cuenta el vapor de salida de la caldera.

El primer paso a realizar fue la estructura que sostuviese la caldera, la cual fue realizada en hierro fundido con aleación de cobre, con medidas de:

- 50,5 cm de largo
- 65,5cm de ancho
- 105cm de alto

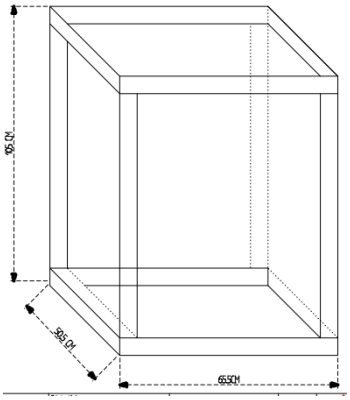


Ilustración 12 plano de la estructura

Para que la caldera se mantenga fija en un punto se han colocado unas manijas entre la estructura y el tanque, las cuales se fijan con tornillos y de esta manera pueda ser removido el tanque en caso que deba arreglarse algo del mismo.



Ilustración 13 estructura sin pintar

Se coloca un codo para una salida horizontal de alivio de presión y visualización del manómetro.



Ilustración 14 codo para visualizar manómetro verticalmente

Con la estructura lista, se procede a ser pintada con pintura electrostática, en la que la estructura es pintada de negro y el tanque de rojo, como se observa en la figura 15:

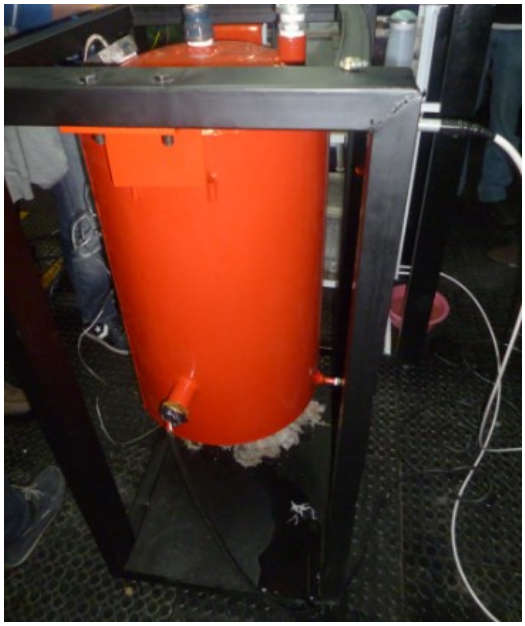


Ilustración 15 estructura pintada

5.2.2 implementación de los actuadores

Inicialmente se consigue una resistencia de inmersión (para baño maría) de 2000Watts/220Vac, la cual es reemplazada actualmente por una resistencia externa de 2500Watts/220Vac proporcionándonos una mejora significativa en el rendimiento, dando como resultado los siguientes datos (colocar tabla de tiempos y presiones).



Ilustración 16 resistencia

Se implementa una bomba hidráulica de ½ HP, alimentada a 110Vac para circular el agua desde el tanque de almacenamiento de agua hacia el tanque de vaporización.



Ilustración 17 bomba de agua

En vista de los precios elevados y complicada consecución de una electro-válvula lineal, se inicia la elaboración de la válvula, permitiéndonos ahorrar costos.

5.2.2.1 Válvula lineal servo-accionada

Debido a que se requería controlar la temperatura del producto de una manera indirecta al manipular la apertura de la válvula a fin de regular el flujo de vapor por el intercambiador se procede a evaluar las características del proceso y los elementos con los que se acoplaría la válvula para funcionar de la manera esperada.

La válvula debía ser capaz de soportar al menos 60 PSI de presión a una temperatura de casi 150°C. Se pretendía controlar de una manera más fácil al ser lineal y debido a que el PLC con el que se pretendía hacer la acción de control no contaba con puertos análogos de salida o puertos digitales de salida de conmutación rápida no era posible aplicar un PWM sobre la válvula. El PLC Allen Bradley cuenta en cambio con un puerto de comunicación RS-232, de tal modo que se utilizaría para enviar un valor equivalente a un porcentaje de apertura en la válvula.

Se adquiere una válvula para vapor lineal (figura 18) en acero inoxidable la cual soporta una presión de hasta 6000 PSI y 350º C. Requiere de cuatro vueltas entre el cierre y la apertura total. Al aplicar un flujo de vapor a 40 PSI la temperatura de la válvula se elevó hasta los 132°C. A fin de evitar que la temperatura afecte los motores y sensores de posición se optó por acoplar el motor a la válvula por medio de un par de poleas una en nylon para el motor y sensor de posición y una en aluminio mecanizada al vástago de la válvula. Las poleas están acopladas pos medio de una correa capaz de soportar 140°C.

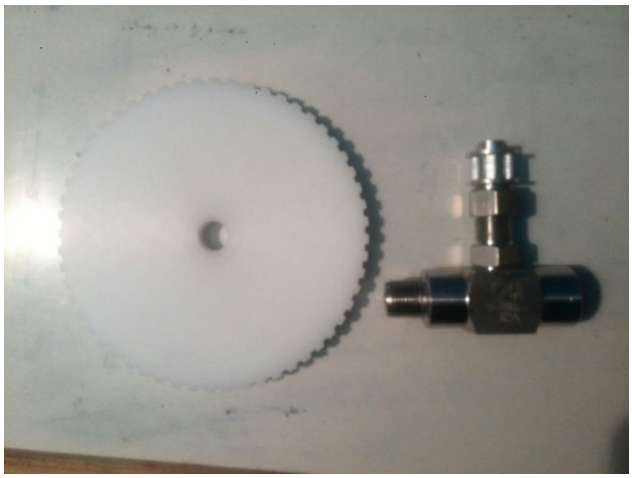


Ilustración 18 válvula

Se resolvió elaborar una caja de dimensiones 18 cm de ancho por 40 cm de largo por 10 cm de alto, en la cual se acomodaron los componentes concernientes a operación, control y comunicación de la válvula ver figura 19.

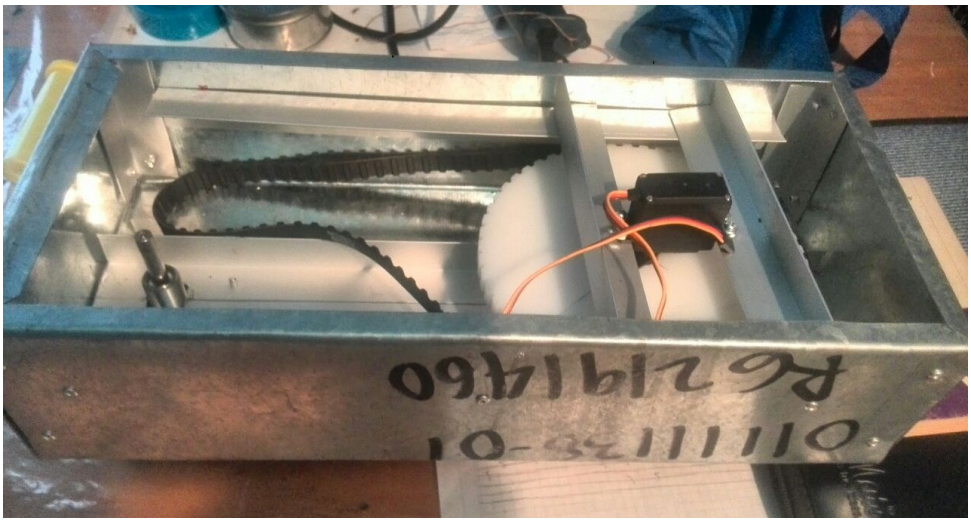


Ilustración 19 estructura de la electro válvula

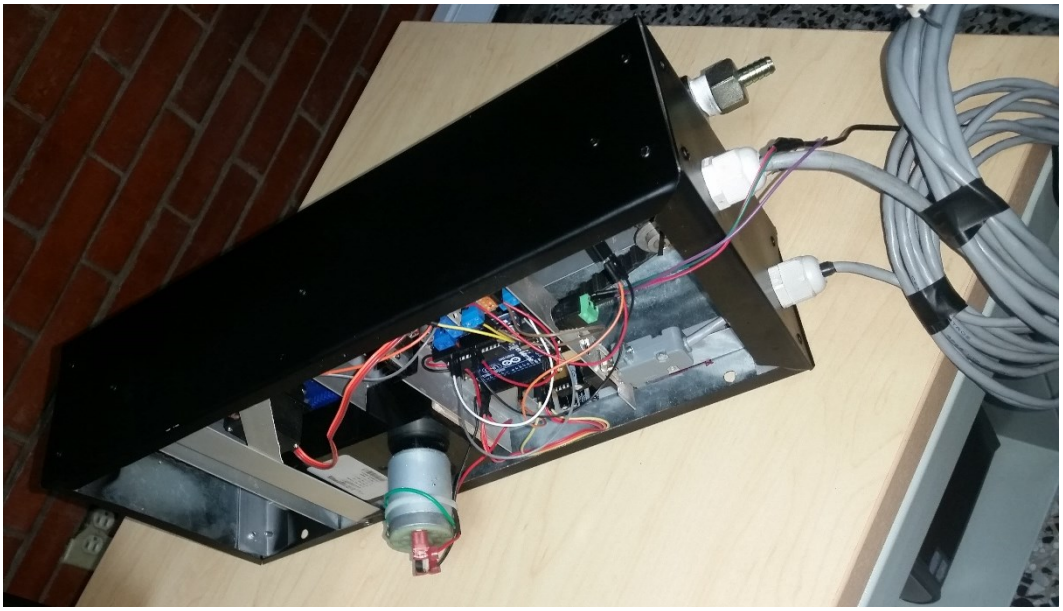


Ilustración 20 Válvula Terminada

5.2.3 Implementación de los transductores

Se efectúa la toma de datos de temperatura a través de una termocupla tipo k de hasta 450º C, ver figura 18



Ilustración 21 termocupla

Para la adquisición del nivel de agua dentro del tanque se optó por un sensor de nivel infrarrojo, dispuesto sobre la mirilla tipo tubo de cristal ver ilustración 21, con esta señal conseguimos encender o apagar la bomba para suministrarle agua al tanque.



Ilustración 22 mirilla de cristal



Ilustración 23 sensor de nivel

Los datos de presión además de visualizarlos de forma física a través del manómetro son adquiridos por medio del sensor de presión KE-26062 ver ilustración 23.



Ilustración 24 sensor de presión

5.2.3.1 linealización sensor de presión

A pesar de que el sensor de presión KE-26062 ofrece linealidad en el rango de 0V a 5V entre presión atmosférica y 150 PSI, los cambios de temperatura provocan una histéresis en el sensor. Del tal modo que se realizó un experimento para corregir la medición a partir de la ecuación característica basados en las siguientes mediciones:

	DATOS OBTENIDOS EN VOLTIOS										
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	PROM
0 PSI	0,6	0,68	0,73	0,7	0,63	0,72	0,61	0,67	0,6	0,6	0,654
3 PSI	0,62	0,72	0,74	0,74	0,63	0,72	0,63	0,67	0,63	0,62	0,672
6 PSI	0,62	0,75	0,77	0,78	0,65	0,73	0,63	0,71	0,63	0,63	0,69
9 PSI	0,63	0,79	0,81	0,81	0,69	0,73	0,64	0,73	0,64	0,63	0,71
10 PSI	0,63	0,83	0,87	0,85	0,73	0,74	0,67	0,77	0,74	0,86	0,769

12 PSI	0,86	0,87	0,94	0,93	0,78	0,78	0,71	0,81	0,87	0,91	0,846
14 PSI	0,91	0,92	1,01	0,99	0,84	0,816	0,77	0,89	0,97	1,03	0,914
16 PSI	1,03	0,98	1,09	1,06	0,91	0,975	0,82	0,96	1,06	1,07	0,995
18 PSI	1,07	1,02	1,14	1,11	1,05	1,05	0,88	1,07	1,15	1,17	1,07
20 PSI	1,17	1,06	1,18	1,17	1,12	1,14	0,94	1,18	1,23	1,22	1,14
22 PSI	1,22	1,14	1,24	1,23	1,19	1,27	1,02	1,23	1,27	1,26	1,20
24 PSI	1,26	1,19	1,32	1,30	1,26	1,36	1,10	1,34	1,34	1,35	1,28
26 PSI	1,35	1,24	1,38	1,36	1,34	1,46	1,17	1,39	1,52	1,41	1,36
28 PSI	1,41	1,32	1,45	1,50	1,41	1,55	1,23	1,45	1,57	1,49	1,43
30 PSI	1,49	1,37	1,61	1,57	1,47	1,66	1,29	1,54	1,63	1,54	1,51
32 PSI	1,54	1,43	1,67	1,64	1,53	1,74	1,37	1,63	1,7	1,62	1,58
34 PSI	1,62	1,50	1,73	1,68	1,61	1,86	1,46	1,72	1,73	1,7	1,66
36 PSI	1,70	1,56	1,81	1,71	1,71	1,97	1,52	1,81	1,79	1,73	1,73
38 PSI	1,73	1,61	1,87	1,77	1,77	2,07	1,62	1,88	1,82	1,79	1,79
40 PSI	1,79	1,68	1,92	1,84	1,83	2,16	1,71	1,93	1,87	1,83	1,85
42 PSI	1,83	1,75	2,01	1,87	1,89	2,28	1,78	2,01	1,88	1,85	1,91
44 PSI	1,85	1,81	2,10	1,90	1,92	2,36	1,81	2,06	1,92	1,88	1,96

Tabla 1 datos sensor de presión

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_n}{n} \qquad (1)$$

La siguiente grafica muestra la curva característica del sensor a partir del promedio de las mediciones anteriores. Se puede ver la ecuación que describe el comportamiento del sensor y el factor de linealidad del 98.6%.

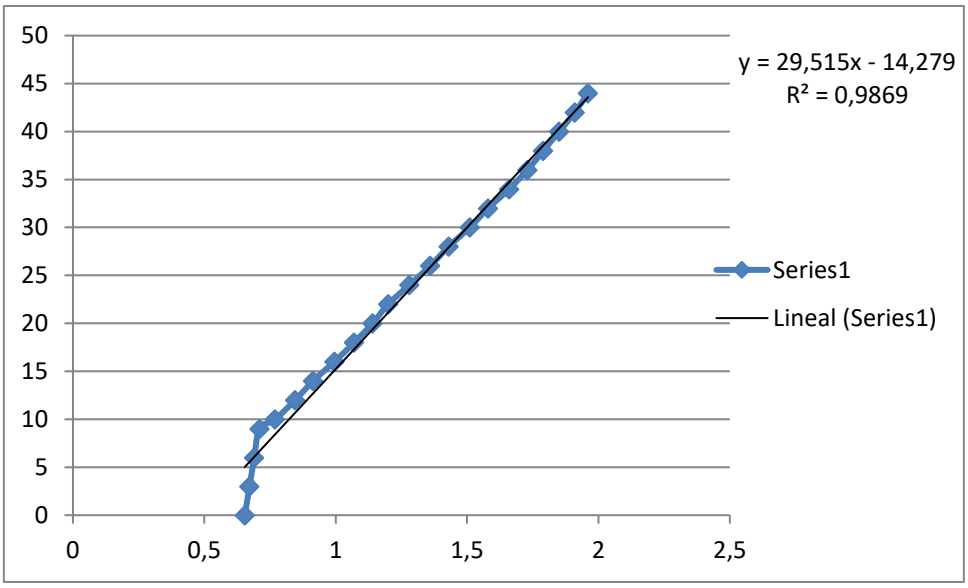


Ilustración 25 interpolación sensor de presión

$$P = 29{,}515x - 14{,}279 \qquad (2)$$

El error sistemático y el error sistemático porcentual o error BIAS se definen a partir de las ecuaciones:

$$E = \overline{x} - x_T \qquad (3)$$

$$E(\%) = \beta = \frac{\overline{x} - x_T}{x_T} \cdot 100\% \qquad (4)$$

A partir de estas ecuaciones se obtienen la siguiente tabla:

PATRON	PROMEDIO PSI	ERROR SISTEMATICO	ERROR BIAS %
0 PSI	5,02381	5,02381	100
3 PSI	5,55508	2,55508	45,9953772
6 PSI	6,08635	0,08635	1,41874851
9 PSI	6,67665	-2,32335	-34,7981398
10 PSI	8,418035	-1,581965	-18,7925686
12 PSI	10,69069	-1,30931	-12,2471983
14 PSI	12,69771	-1,30229	-10,2561013
16 PSI	15,088425	-0,911575	-6,04155172
18 PSI	17,30205	-0,69795	-4,03391506
20 PSI	19,3681	-0,6319	-3,26258125
22 PSI	21,139	-0,861	-4,07304035
24 PSI	23,5002	-0,4998	-2,12679041
26 PSI	25,8614	-0,1386	-0,53593386
28 PSI	27,92745	-0,07255	-0,25978025
30 PSI	30,28865	0,28865	0,95299724
32 PSI	32,3547	0,3547	1,09628586
34 PSI	34,7159	0,7159	2,06216748
36 PSI	36,78195	0,78195	2,12590686
38 PSI	38,55285	0,55285	1,43400553
40 PSI	40,32375	0,32375	0,80287672
42 PSI	42,09465	0,09465	0,22485043
44 PSI	43,5704	-0,4296	-0,98599049

Tabla 2 Error sistemático y Bias

5.2.4 implementación de sistema de aislamiento

Debido a las pérdidas de calor y la poca eficiencia que se presentaba para producir vapor en el menor tiempo posible se decide colocar un aislamiento térmico compuesto por una capa de frescasa, la cual con sus propiedades de aislante térmico e incombustible nos proporciona un control y mantenimiento de temperatura.



Ilustración 26 frescasa

Sobre la capa de frescasa se colocó una capa de thermo espuma (thermolon) la cual nos brinda aislamiento térmico de masa y de reflexión ya que posee una membrana de aluminio puro.



Ilustración 27 thermolon

Dando como resultado un aislamiento térmico compacto y eficiente para los requerimientos del proyecto ver ilustración 27.



Ilustración 28 sistema de aislamiento

5.2.5 implementación de sistema de alimentación y cableado eléctrico

Al requerir de 5Vdc para alimentar la sensorica, se diseña un circuito de regulación a 5Vdc que encaje dentro de los parámetros de diseño estructural.

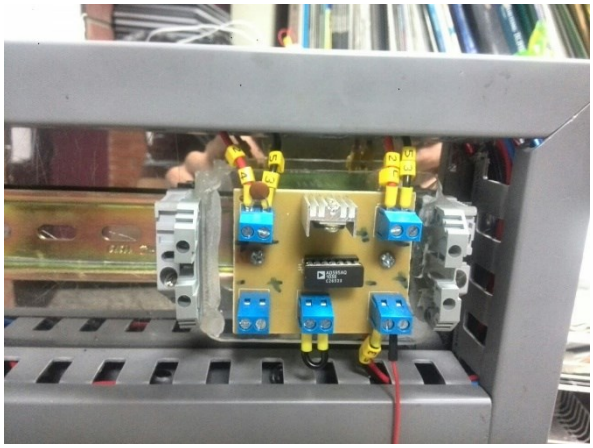


Ilustración 29 módulo de regulación 5V

Las borneras se dispusieron en un tablero de forma que el espacio fuera eficiente y suficiente para las diferentes conexiones, ver ilustración 30

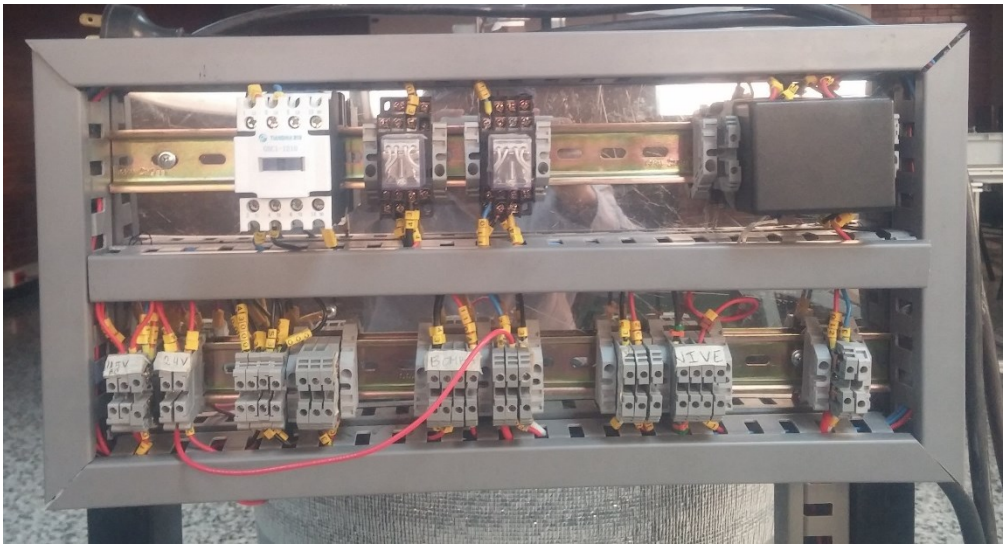


Ilustración 30 tablero de conexiones

5.2.6 Análisis termodinámico del tanque

5.2.6.1 Características del sistema termodinámico

Inicialmente, el agua dentro de la caldera ocupa un volumen de $V = 0.036891197\ m^3$ equivalente al 48% del volumen total; de esta manera se evidencia que la resistencia queda sumergida en su totalidad dentro del líquido. Con ayuda de la densidad es posible determinar la masa de agua de nuestro sistema:

$$v = \frac{V}{m} \quad v = \frac{1}{\rho} \qquad (5)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad m = V \cdot \rho \qquad (6)$$

$$m = 0.03689119756\ m^3 \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{m = 36.8911976 kg} \qquad (8)$$

El volumen durante todo el procedimiento es constante, por tal razón se considera un proceso isocórico.

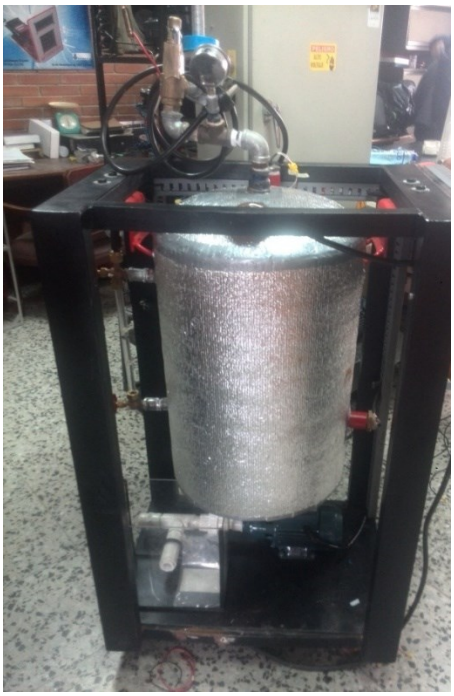


Ilustración 31 caldera

5.2.6.2 Procedimiento

a) Medir volumen, volumen específico y masa del sistema.

b) llenar la caldera con agua a una altura de 33cm (según el indicador de nivel) que corresponde a los 36.8911976kg. de masa.

c) Conectar la resistencia eléctrica a la toma

d) genera vapor, abrir la válvula para casar el aire que permanece en el interior de la caldera

e) Cerrar la válvula, tomar los datos para determinar el primer estado termodinámico

f) Esperará hasta que la presión alcance 36 psi, tomar mediciones, determinar el segundo estado termodinámico

5.2.6.3 Mediciones Y Cálculos:

Con el fin de establecer el volumen de la caldera, se realizan medidas del radio y altura de la misma, si bien la caldera tiene dos secciones, cóncava abajo convexa arriba (iguales), estos datos no serán tenidos en cuenta para el cálculo del volumen total.

Altura: $0.60\ m$ (9)

Diámetro: $0{,}40m$ (10)

Volumen de un cilindro = $\pi r^2 \cdot h$ (11)

Volumen total = $0.075398223\ m3$ (12)

El volumen que debe ocupar la masa de agua para generar vapor debe estar entre un 45% y 50% de la totalidad de la caldera según experimentos realizados previamente. Por lo cual se calculó la altura a la que debe ser llenada.

5.2.6.4 Características de la resistencia

Información

Potencia = $2500w$

Datos medidos

Resistencia = $13.53\ Ohmios$

Tensión línea = $115\ VAC$

Corriente Resistencia = $8.5\ A$

$$\text{Potencia} = P = V \cdot I \quad (13)$$

$$P = 115V \cdot 8.5\ A = 977.5\ w \quad (14)$$

5.2.6.5 Datos obtenidos:

Luego de realizar el procedimiento hasta el paso e. Se procede a tomar los datos de primer estado termodinámico

ESTADO INICIAL

- Presión: 20 psi
- Temperatura: 227,12 ºF

A partir de este punto se comienza con el registro de datos en función de la presión alcanzada por el sistema.

Partiendo del estado inicial tanto la presión como la temperatura aumentaron hasta llegar a los 36 PSI. Durante este lapso de tiempo la temperatura correspondió en su mayoría a las tablas de saturación liquido-vapor

Finalmente, al llegar a los 36 PSI tanto la presión como la temperatura dejaron de aumentar. En este punto (tres horas después del estado inicial 10800 segundos) se apaga la resistencia y se toman los datos nuevamente en intervalos regulares. Los resultados fueron:

PRESION (PSI)	TEMPERATURA (°F)	MEDIDOR (mm)
0	197	330
2	202,2	330
4	203,7	332
6	211,2	334
12	211,2	335
18	215,3	336
20	227,12	336
22	232	336
24	238,5	337
26	242,7	338
28	249,8	339
30	250,2	339
32	258,2	339
34	256,6	339
36	260,5	340
34	257,5	340
32	255,3	340
30	255	339
28	252,1	339
24	250,3	338
22	250,3	338
20	250,3	338

Tabla 3 Datos medidos

PRESION (PSI)	TEMPERATURA (°F)
2	126.06
3	141.45
4	152.95
5	162.22
7.5	179.93
10	193.20
14.696	212
15	213.04
20	227.97
25	240.09
30	250.36
35	259.31
40	267.28
45	274.27
50	281.05

Tabla 4 saturación liquido-vapor libro ingeniería termodinámica J.B. Jones

Para poder realizar una comparación de los datos tomados en la práctica respecto a las tablas teóricas del libro, es necesario interpolar la temperatura a las presiones tomadas en el procedimiento

PRESION (PSI)	TEMPERATURA (°F)
2	126.06
4	152.95

6	174.026
12	201.206
18	221.998
20	227,97
22	232.818
24	237.666
26	242,144
28	246.252
30	250,36
32	253.94
34	257,52
36	260,904

Tabla 5 interpolación temperatura respecto a los datos tomados en la práctica de presión con la tabla del libro ingeniería termodinámica J.B. Jones

Para determinar qué tan precisos fueron los datos tomados, hacemos uso del error relativo que es igual al valor teórico menos el practico sobre el teórico por cien para obtener el resultado el porcentaje y facilitar la comparación

$$E\ relativo = \left|\frac{V\ teorico - V\ practico}{V\ teorico}\right| \cdot 100 \qquad (15)$$

T (°F) V teórico	T (°F) V practico	Er
126.06	202,2	60.399 %
152.95	203,7	33.180 %
174.026	211,2	21.361

		%
201.206	213,2	5.9610 %
221.998	215,3	3.0171 %
227,97	227,12	0.3728 %
232.818	232	0.3513 %
237.666	238,5	0.3509 %
242,144	242,7	0.2296 %
246.252	249,8	1.4408 %
250,36	250,2	0.0639 %
253.94	258,2	1.6775 %
257,52	256,6	0.3572 %
260,904	260,5	0.1548 %

Tabla 6 Error relativo, valor teórico vs práctico

A partir de la tabla anterior podemos determinar para nuestro análisis el rango de temperatura con el error más pequeño. Estos datos se encuentran dentro del rango correspondiente en presión a 20 y 36 psi. Estos datos que son los más aproximados a los datos de la tabla de valores teóricos.

5.2.6.6 Análisis de resultados:

Conociendo el tiempo en el cual estuvo conectada la resistencia suministrando energía al sistema a partir del estado inicial es posible calcular la energía en forma de calor proporcionada mediante la ley de joule.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \qquad (16)$$

Donde t esta dada en segundos

$Q = \ 8.5^2 \cdot 13.53 \cdot 10800s$

$Q = 10557.459\ KJ$

Es posible hallar el volumen especifico del sistema a partir del volumen total y la masa del sistema, partiendo de un proceso isocorico tenemos que:

$$v = \frac{V}{m} \qquad (10)$$

$$V = 0.075398223\ m^3 \left(\frac{35.315\ ft^3}{m^3}\right) \qquad (17)$$

$$V = 2.662688\ ft^3 \qquad (18)$$

$$m = 36.811197\ kg \left(\frac{2.2046226\ lbm}{kg}\right) \qquad (19)$$

$$m = 81.1547968\ lbm \qquad (20)$$

$$v = v1 = v2 = \frac{2{,}662688 ft^3}{81{,}1547968 bm} \qquad (21)$$

$$v = 0{,}032809\ \frac{ft^3}{lbm} \qquad (22)$$

5.2.6.7 Análisis primer estado:

Con el volumen específico es posible Determinar la calidad para el primer estado, y con la calidad, es posible hallar la entalpia.

$$X = \frac{0{,}03281 - 0{,}016829}{20.09 - 0{,}016829}.100 = 0{,}079\% \qquad (23)$$

$$h1 = hf1 + x1(hg1 - hf1) \quad (24)$$

$$h1 = 196.29 + 0.0007(1156.3 - 196.29) \quad (25)$$

$$h1 = 197.05429\ {}^{B}/_{lbm} \quad (26)$$

$\boldsymbol{p1}$ $(\boldsymbol{ps1})$	20
$\boldsymbol{T1}$ $(\boldsymbol{f})$	227.12
$\boldsymbol{vf}\left(\frac{\boldsymbol{ft^3}}{\boldsymbol{lbm}}\right)$	0.016829
$\boldsymbol{vg}\left(\frac{\boldsymbol{ft^3}}{\boldsymbol{lbm}}\right)$	20.09
$\boldsymbol{v1}\left(\frac{\boldsymbol{ft^3}}{\boldsymbol{lbm}}\right)$	0,032809
$\boldsymbol{hf}\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{lbm}}\right)$	196.29
$\boldsymbol{hg}\left(\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{lbm}}\right)\right.$	1156.3
$\boldsymbol{h1}\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{lbm}}\right)$	197.05429
$\boldsymbol{X1}$	0,079%

Tabla 7 datos análisis primer estado

Se observa que la entalpía no varía significativamente ya que la calidad es muy pequeña.

5.2.6.8 Análisis segundo estado:

Para el estado dos, el volumen específico es el mismo que en el estado uno. Entrando por presión a las tablas de saturación liquido-vapor, interpolado entre 3 5psi y 40 psi tenemos

$\boldsymbol{p2\ (psi)}$	36
$\boldsymbol{T2\ (f)}$	261.14
$\boldsymbol{vf2\left(\frac{ft^3}{lbm}\right)}$	0.0170906
$\boldsymbol{vg2\left(\frac{ft^3}{lbm}\right)}$	11.62
$\boldsymbol{v2\left(\frac{ft^3}{lbm}\right)}$	0,032809
$\boldsymbol{hf2\left(\frac{B}{lbm}\right)}$	229.716
$\boldsymbol{hg2(\left(\frac{B}{lbm}\right)}$	1167.84
$\boldsymbol{h2\left(\frac{B}{lbm}\right)}$	230.98246
$\boldsymbol{X2}$	0,135%

Tabla 8 datos análisis segundo estado

$$X = \frac{0,0328-0,0170906}{11,62-0,0170906}.100 = 0,135\% \quad (27)$$

$$h2 = hf2 + x2(hg2 - hf2) \quad (28)$$

$$h2 = 229,71 + 0.0013(1167,8 - 229.71) \quad (29)$$

$$h2 = 230.98246\ {}^{B}/_{lbm} \quad (30)$$

5.2.6.9 Primera ley

Después de obtener los dos estados termodinámicos, es posible determinar la transferencia de calor del sistema en función de los valores establecidos durante el procedimiento y compararlo con el calor suministrado por la resistencia.

$$\Delta U = Q - W \qquad (31)$$

No existe trabajo en este caso.

$$Q = U2 - U1 \qquad (32)$$

$$Q = m(u2 - u1) \qquad (33)$$

$$Q = m\big((h2 - p2v2) - (h1 - p1v1)\big) \qquad (34)$$

$$Q = m(\ h2 - p2v2 - h1 + p1v1) \qquad (35)$$

Proceso isocorico $v1 = v2 = v$

$$Q = m(\ h2 - p2v - h1 + p1v) \qquad (36)$$

$$Q = m(\ h2\ + v(p1 - p2) - h1) \qquad (37)$$

Remplazando valores tenemos:

$$Q = 81.15lbm\left(33.92\frac{B}{lbm} - 0.0971\frac{B}{lbm}\right) \qquad (38)$$

$$Q = 81.15479\ lbm\ \left(33.83102907\frac{B}{lbm}\right) \qquad (39)$$

$$Q = 2745.55\ B\ \left(\frac{1055.06\ J}{B}\right) \qquad (40)$$

$$Q = 2896.72\ KJ \qquad (41)$$

Al hallar la transferencia de calor por medio de la ley de joule y hacer una comparación con el resultado que nos arroja la primera ley en función de masa, presión, volumen especifico y entalpias, se puede determinar que la energía suministrada el sistema es menor que la entregada por la resistencia, en otras palabras el sistema pierde aproximadamente $7660.739\ kj$ en el ambiente debido a que no se encuentra totalmente asilado y existen perdidas de calor.

5.2.6.10 Entalpias

Las entalpias del estado uno y dos, también se pueden determinar por medio del calor específico del agua y la temperatura a la cual está sometido el líquido.

$$h = ct \qquad (42)$$

$$h1 = CT1 \quad h2 = CT2 \qquad (43)$$

$$C\ agua = 4{,}188 \frac{kj}{kg\ k} \qquad (44)$$

$$T1 = \ 227.12\ °\mathrm{F}\ = 108.4\ ℃ \qquad (45)$$

$$h1 = 4{,}188 \frac{kj}{kg\ k}\ (108.4\ ℃) \qquad (46)$$

$$h1 = 453.97 \frac{kj}{kg} \left(\frac{0.94781}{kj}\right)\left(\frac{kg}{2.2046 lbm}\right) \qquad (47)$$

$$\mathrm{h1} = 195.17 \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{lbm}} \qquad (48)$$

$$T2 = \ 261.14\ °\mathrm{F}\ = 127.3\ ℃ \qquad (49)$$

$$h2 = 4{,}188 \frac{kj}{kg\ k}\ (127.3\ ℃) \qquad (50)$$

$$h2 = 533.13 \frac{kj}{kg} \left(\frac{0.94781}{kj}\right)\left(\frac{kg}{2.2046 lbm}\right) \qquad (51)$$

$$h2 = 229.2042\ \frac{B}{lbm} \qquad (52)$$

Al realizar una comparación es posible afirmar que al calcular las entalpias con la formula por medio del calor especifico del agua y compararlas con las entalpias halladas en los dos estados termodinámicos, son valores muy aproximados. Lo que corrobora que el procedimiento es acertado.

$h1 = 195.17 \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{lbm}}$
$h2 = 229.2042\ \frac{B}{lbm}$

Tabla 9 entalpias calculadas con el calor especifico del agua

$h1 = 197.05429\ \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{lbm}}$
$h2 = 230.98246\ \frac{B}{lbm}$

Tabla 10 entalpias determinadas en los estados termodinámicos con ayuda de las tablas

5.2.6.11 Indicador de nivel

Por medio del indicador de nivel es posible determinar la calidad respecto a la diferencia que existe entre alturas del fluido. Del primer estado al segundo estado hubo un diferencial de altura de 1 cm, con esto podemos determinar el volumen de agua que aumento en el proceso y sumarlo al volumen de agua del primer estado que sería el Volumen de agua total de nuestro segundo estado.

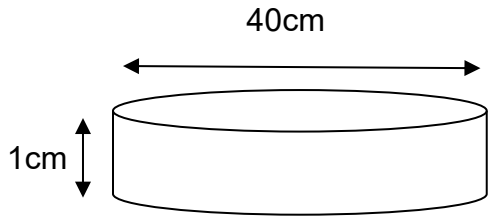


Ilustración 32 volumen del agua

$$V\ aumento = \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0.2^2 \cdot 0{,}01\right) m^3 \qquad (53)$$

$$V\ aumento = 0{,}00031415926 m^3 \qquad (54)$$

$$V\ total = \ 0.03689119 + \ 0{,}00031416 \qquad (55)$$

$$V\ total = 0.037205356\ m^3 \qquad (56)$$

La masa del sistema no cambia, con el último dato obtenido es posible hallar el volumen específico del agua, el cual debe coincidir con el $vf2$ del segundo estado.

$$vf = \frac{VT_2}{m} = \frac{0{,}037205356\ m^3}{36{,}8911976\ \mathrm{kg}} \qquad (57)$$

$$vf = 1{,}008515\ x10^{-3}\ \frac{m^3}{kg}\left(\frac{35.315\ ft^3}{m^3}\right) \qquad (58)$$

$$vf = 0.0356157\ \frac{ft^3}{kg}\left(\frac{kg}{2.2046226\ lbm}\right) \qquad (59)$$

$$vf = 0{,}0161550\ \frac{ft^3}{lbm} \qquad (60)$$

Al comparar el vf partiendo del medidor respecto al vf determinado teóricamente, sus valores son muy aproximados.

$$vf\ medidor = 0{,}0161550\ \frac{ft^3}{lbm} \qquad (61)$$

$$vf = 0{,}017090\ \frac{ft^3}{lbm} \qquad (62)$$

5.2.6.12 Simulaciones

Por medio del software Termograf se pudo hacer la simulación del proceso desde los estados 1 al 2. Se definió como un sistema isocórico cuyo comportamiento es:

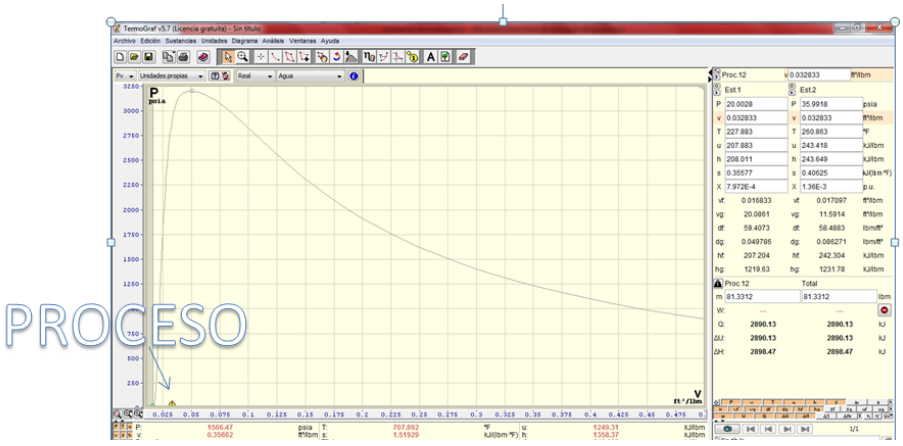


Ilustración 33 termograf estado 1

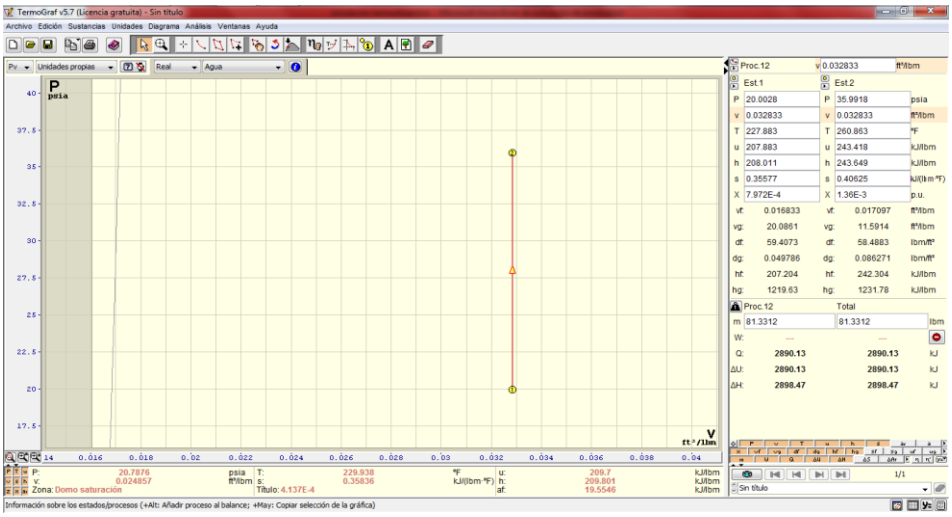


Ilustración 34 termograf estado 2

Los datos arrojados por el simulador fueron los siguientes:

Proc.12		v	0.032833	ft³/lbm
Est.1			Est.2	
P	20.0028	P	35.9918	psia
v	0.032833	v	0.032833	ft³/lbm
T	227.883	T	260.863	°F
u	207.883	u	243.418	kJ/lbm
h	208.011	h	243.649	kJ/lbm
s	0.35577	s	0.40625	kJ/(lbm·°F)
X	7.972E-4	X	1.36E-3	p.u.
vf:	0.016833	vf:	0.017097	ft³/lbm
vg:	20.0861	vg:	11.5914	ft³/lbm
df:	59.4073	df:	58.4883	lbm/ft³
dg:	0.049786	dg:	0.086271	lbm/ft³
hf:	207.204	hf:	242.304	kJ/lbm
hg:	1219.63	hg:	1231.78	kJ/lbm
Proc.12		Total		
m	81.3312		81.3312	lbm
W:	---		---	
Q:	**2890.13**		**2890.13**	kJ
ΔU:	**2890.13**		**2890.13**	kJ
ΔH:	**2898.47**		**2898.47**	kJ

Ilustración 35 datos termograf

Al hacer una comparación de estos datos con los datos obtenidos, teórica y experimentalmente estos concuerdan, por lo que el sistema está bien definido y los cálculos son correctos.

5.2.7 Identificación y cálculos de parámetros PID

Con el fin de conocer el comportamiento característico de la planta se busca conocer su dinámica a partir de un proceso de identificación por medio experimental, en donde se puedan conocer datos como temperaturas alcanzadas, tiempos de estabilización y algunas limitaciones del sistema.

Diseño del experimento: teniendo en cuenta las características del proceso de pasteurización didáctica por lotes en el que se desea implementar la caldera la temperatura del producto a alcanzar esta entre 55°C y 65°C por un periodo de entre 12 a 15 minutos.

En vista de que la información del comportamiento de la planta es escasa se optó por buscar en primer lugar el punto de operación de la planta. Se busca controlar la temperatura del proceso por medio del control del flujo de vapor a través de la válvula lineal servo-accionada. Sin embargo, al ser indeterminada la temperatura de vapor y presión relacionada a dicha temperatura, así como los rangos de apertura de la válvula se buscó iniciar con la aplicación de una serie de señales paso para observar y determinar el punto de operación del sistema.

Con una serie de pruebas a diferentes presiones y con una apertura del 50% del recorrido de la válvula de cada una de ellas se obtuvieron los siguientes datos:

Presión (psi)	Temperatura inicial del producto (°C)	Temperatura final del producto(°C)	Tiempo que tardo en alcanzar la temperatura máxima (min)	Tiempo de duración del vapor (min)
10	20	24	10	10
20	21	32	14	18
30	20	53	17	23
35	19	64	14	29
40	19	85	12	34

Tabla 11 datos recopilados de la experimentación

Con esta información se pudo establecer un rango de operación entre 35 y 40 PSI, en el cual se alcanza la temperatura esperada en el tiempo requerido.

Como siguiente paso se buscó variar la apertura de la válvula, por lo que se aplicó una señal escalón sobre la señal del punto de operación. Esta vez con una presión del vapor de 40 PSI se obtuvo una respuesta del sistema la cual dio una idea de la forma en la que se comportaría el sistema. Ya que la válvula tiene una apertura máxima a 5V se llevó la señal hasta 80% de apertura y se mantuvo en un 75% de apertura.

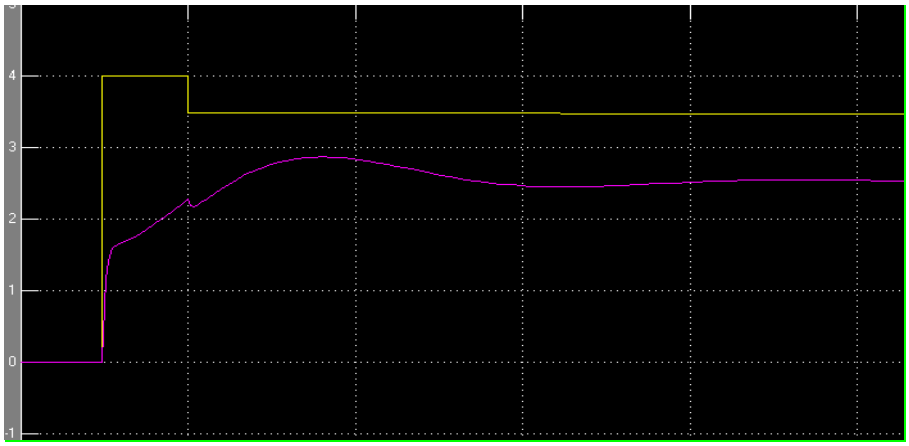


Ilustración 36 señal inyectada y respuesta

Finalmente conociendo el punto de operación y los tiempos aproximados de duración del vapor para el proceso se procedió a aplicar una señal paso con la cual se esperaba la apertura de la válvula oscilara en porcentajes medios y de este modo se pudiese obtener una función de transferencia más confiable y aproximada a la dinámica propia del sistema.

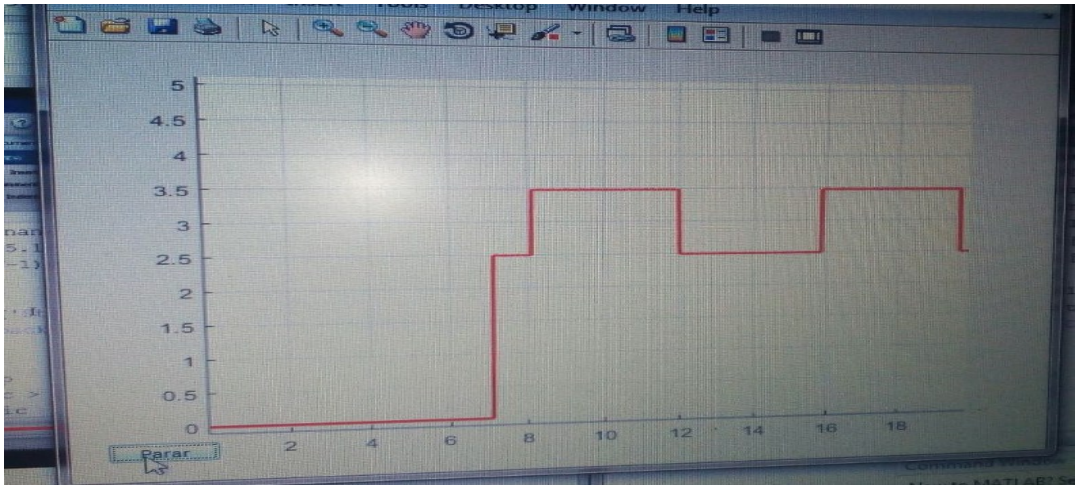


Ilustración 37 señal seudo-aleatoria

una vez la señal paso es generada esta se aplica al circuito de accionamiento de la válvula, las señales de entrada y salida (señal paso y temperatura) se almacenan y grafican en el PLC y HMI respectivamente.

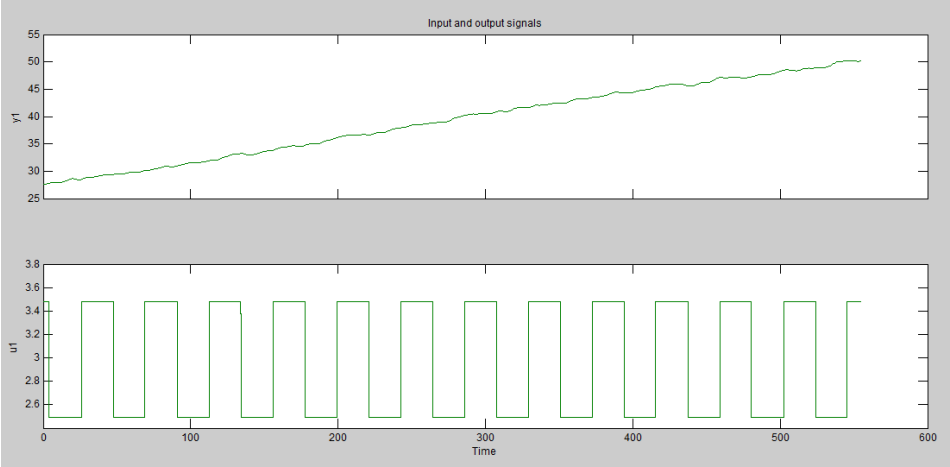


Ilustración 38 señal de salida

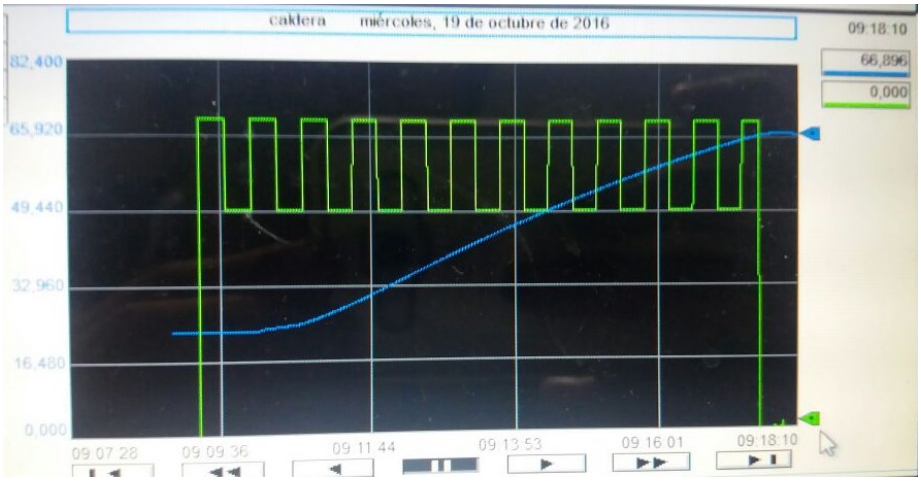


Ilustración 39 senal de salida tomada de la progracion del PLC

Concluido el experimento los datos se exportan al software de simulación matlab. y por medio de la herramienta system identification tool (sisotool) se buscó obtener una función de transferencia que representara de la mejor manera la dinámica del sistema.

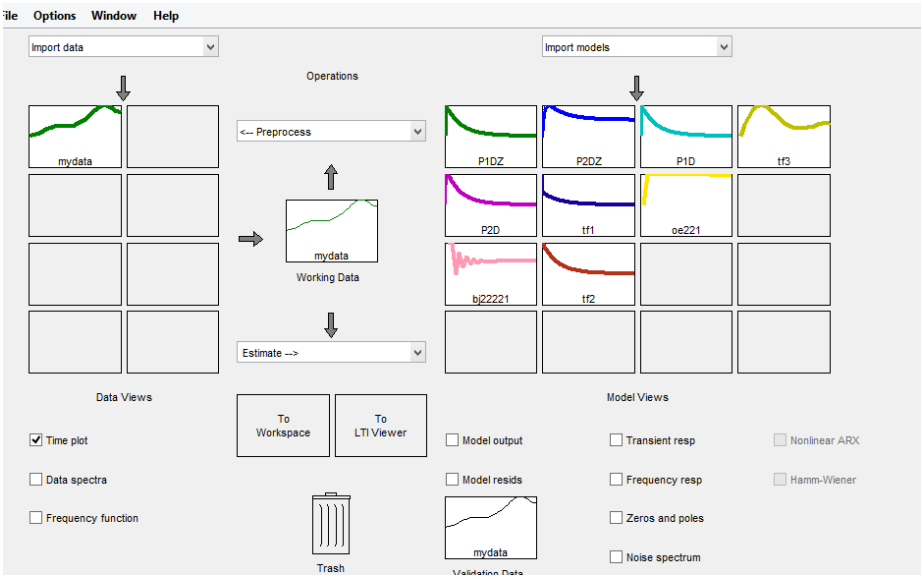


Ilustración 40 system identification tool

A fin de validar el experimento y definir una función de transferencia acorde a las características del proceso se buscó una función cuyo porcentaje de ajuste fuese superior al 95%. Para nuestro caso se eligió entre dos funciones de transferencia; una función de segundo orden tf2 con un porcentaje de ajuste del 98.18% y otra función de transferencia de segundo orden con un porcentaje de ajuste del 98.2%. Las dos funciones son muy similares en comportamiento y estructura sin embargo dado que la función de transferencia tf2 muestra un sobre impulso de aproximadamente 2°C equivalentes a un 3% el sistema necesita un tiempo de estabilización mayor que en un sistema de primer orden, ya que el sistema tarda mucho más tiempo en disminuir la temperatura que en aumentarla. Se eligió la función de transferencia tf2 por su estructura, pues solo tiene un polo en el eje real siendo más fácil de representar en forma de ecuación en diferencias.

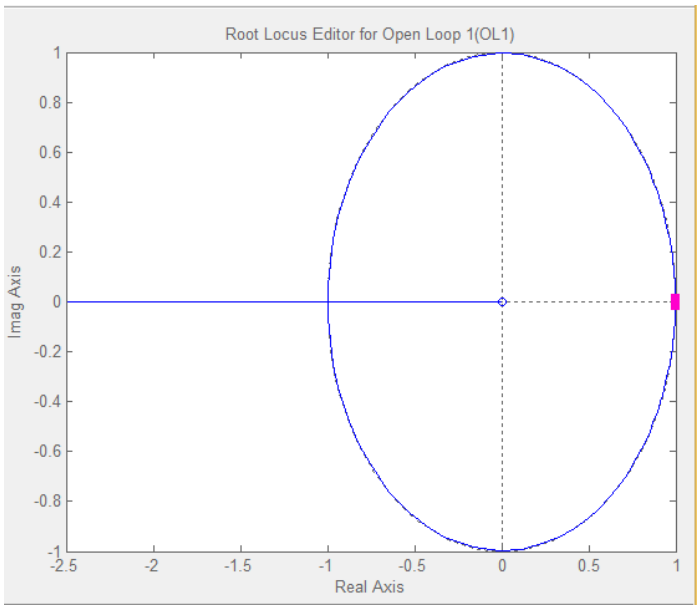


Ilustración 41 Corrección de polos

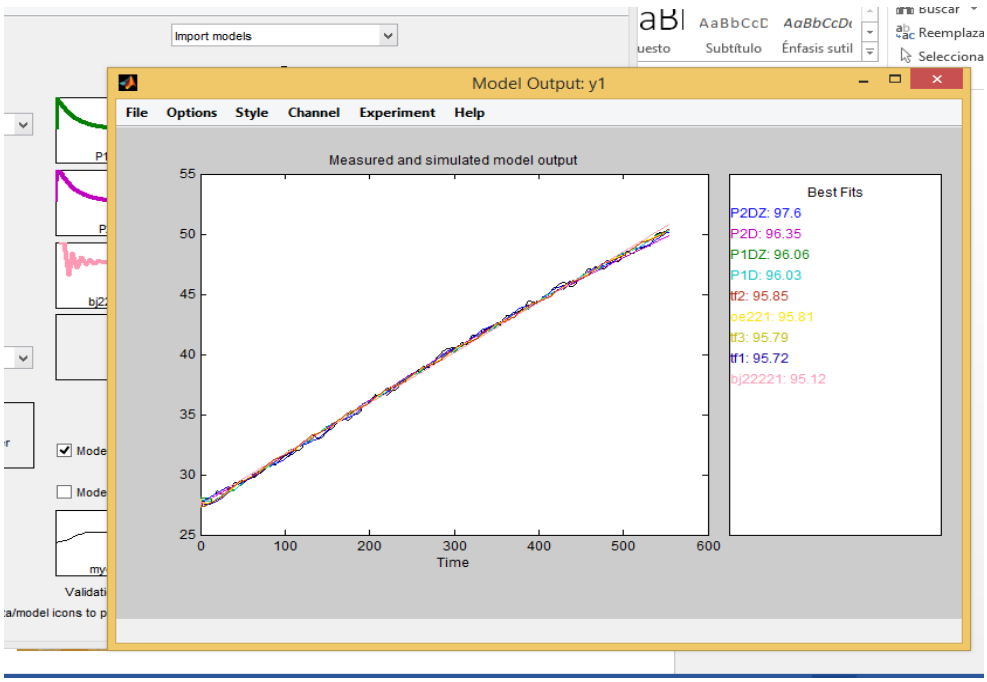


Ilustración 42 Señal simulada

```
>> gs

gs =

  From input "u1" to output "y1":
                 43.18
  exp(-15*s) * ----------
               2129 s + 1

Name: P1D
Continuous-time transfer function.
```

Ilustración 43 parámetros matlab

La función en tiempo continuo se lleva a tiempo discreto por el método de retenedor de orden cero, con lo que se obtiene la función de transferencia discreta:

```
>> gz1=c2d(gs,0.5)

gz1 =

  From input "u1" to output "y1":
              0.01014
  z^(-30) * ----------
             z - 0.9998

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Ilustración 44 parámetros matlab

Se hace la corrección del modelo polinómico con los datos con los que fue obtenida la discretización.

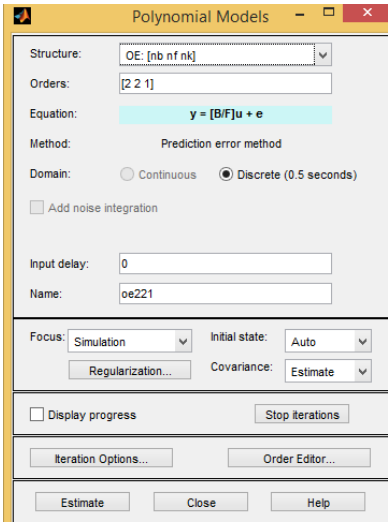


Ilustración 45 discretización

La herramienta control and estimation manager se hizo una estimación del controlador PID a implementar.

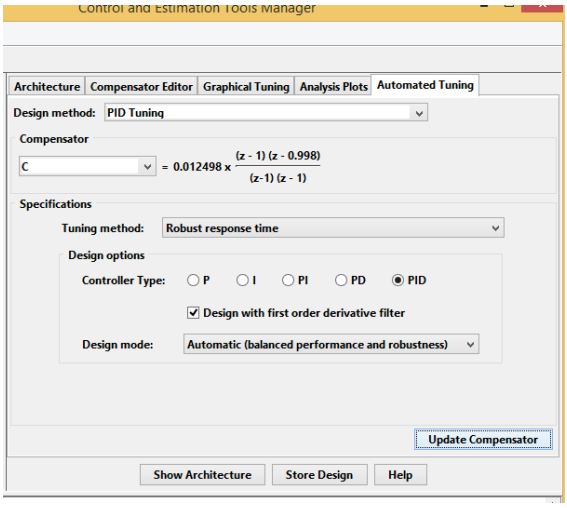


Ilustración 46 control and estimation

El controlador que ajusto automáticamente a la función de comporta de la siguiente manera:

```
                Ts                 1
Kp + Ki * ------ + Kd * -----------
               z-1          Tf+Ts/(z-1)

with Kp = 0.0374, Ki = 2.37e-05, Kd = -29.5, Tf = 1.19e+03, Ts = 0.5
```

Ilustración 47 ajuste de parámetros PID Matlab

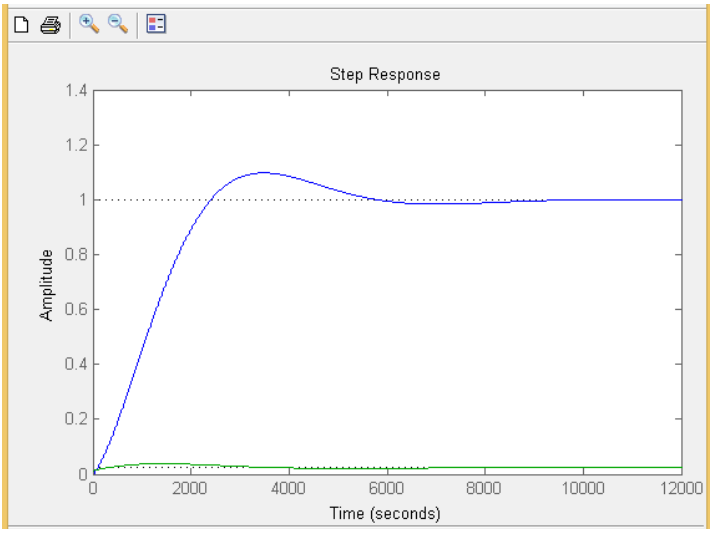


Ilustración 48 señal de respuesta PID

Como se mencionó anteriormente, se busca evitar un sobre impulso en la señal ya que esto el tiempo real de disminución de la temperatura en el sistema llevaría a un tiempo de estabilización mayor. Por esta razón se buscó configurar los valores del controlador para que el sistema tienda a comportarse como un sistema de primer orden sin sobre impulso.

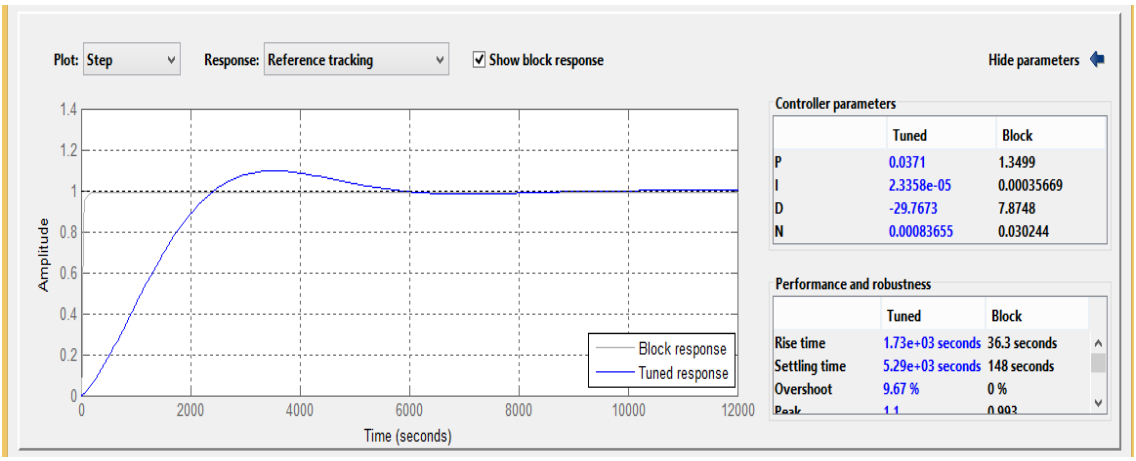


Ilustración 49 Respuesta al sistema con los valores del controlador sin modificar

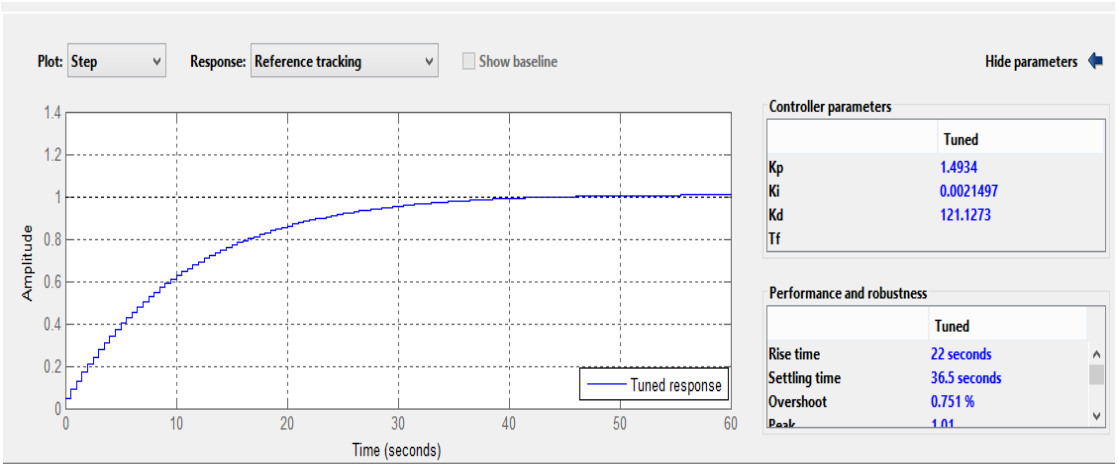


Ilustración 50 Respuesta al sistema con los valores del controlador modificados

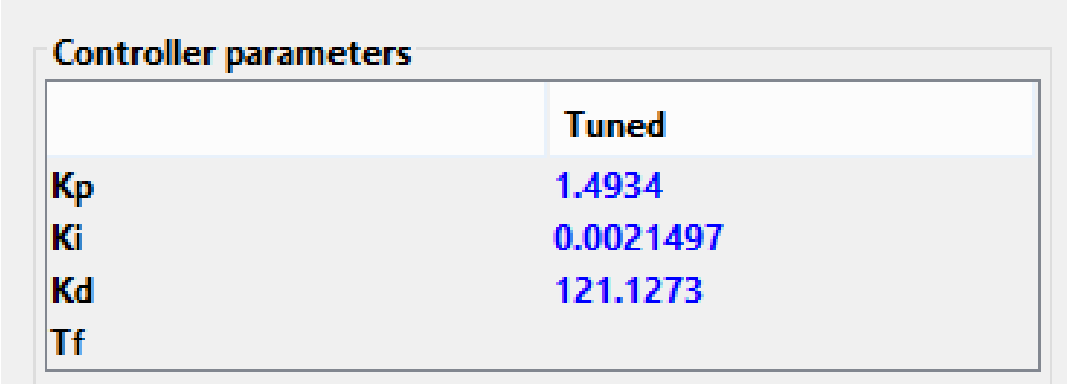


Ilustración 51 Valores PID del controlador

Finalmente se hizo nuevamente la simulación de la planta con los nuevos parámetros del controlador a fin de corroborar su comportamiento.

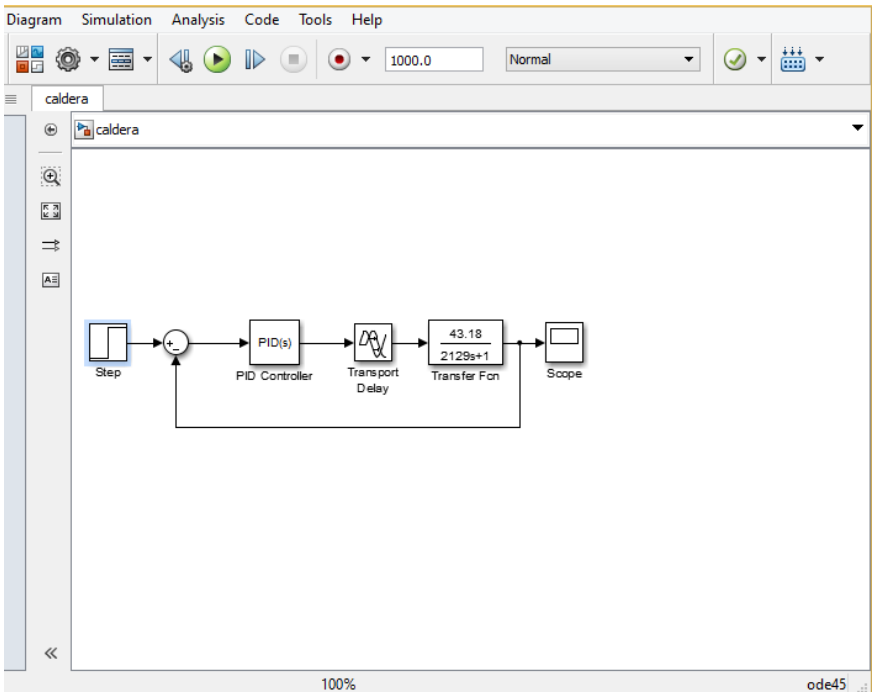


Ilustración 52 diagrama de bloques simulink

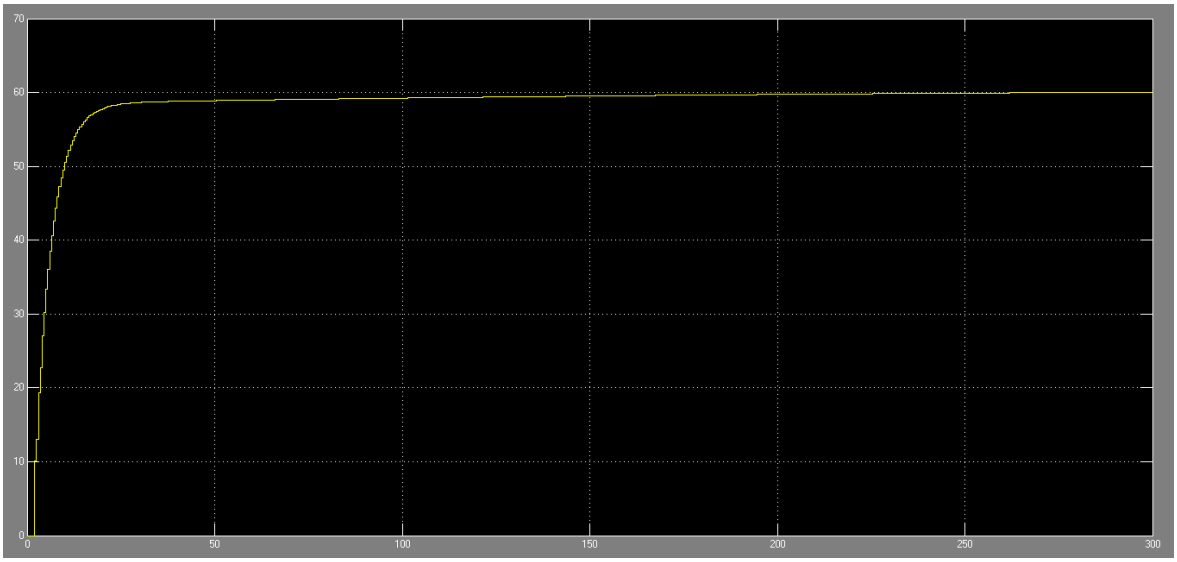


Ilustración 53 señal de salida simulink

5.2.8 Implementación del diseño del controlador PID en el PLC Allen Bradley e interfaz gráfica HMI.

Una vez determinadas las constantes del controlador el paso siguiente es aplicar el controlador PID en el proceso por medio del PLC y el HMI. Para tal efecto es necesario definir un esquema general por medio del cual sea posible tener una visión global del sistema.

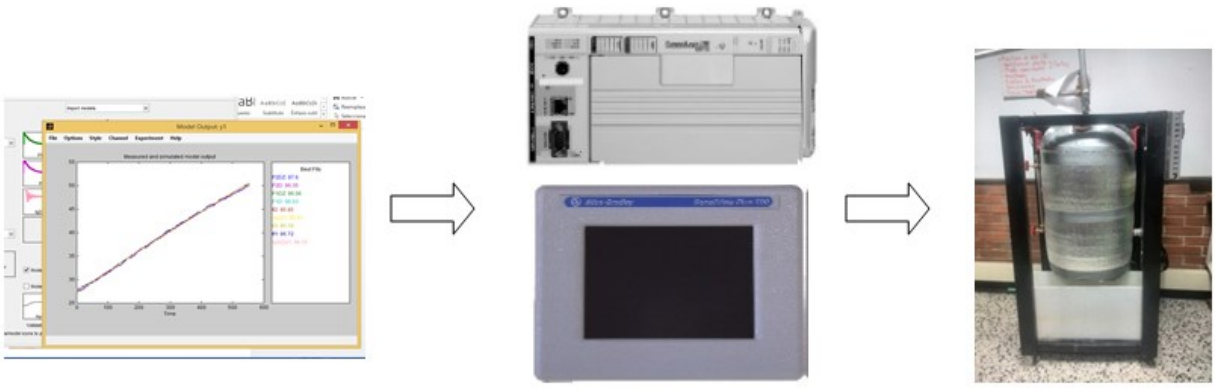


Ilustración 54 Esquema de control

De acuerdo con los sensores y actuadores del sistema se definieron las siguientes entradas y salidas tanto análogas como digitales:

- Sensor de nivel: entrada digital al PLC
- Sensor de temperatura del vapor: entrada análoga (0-5V) al PLC
- Sensor de presión: entrada análoga (0-5V) al PLC
- Sensor de temperatura del producto a calentar: entrada al PLC por medio del módulo de comunicación Ethernet.
- Bomba eléctrica: salida digital del PLC
- Válvula servo-accionada: salida del PLC por medio del puerto de comunicación serial RS-232

Debido a las condiciones de presión y temperatura del proceso es necesario seguir una serie de pasos para poner en marcha de forma segura el sistema por lo que se diseñó un protocolo de inicio el cual indica al usuario de forma detallada la manera en la que se debe proceder.

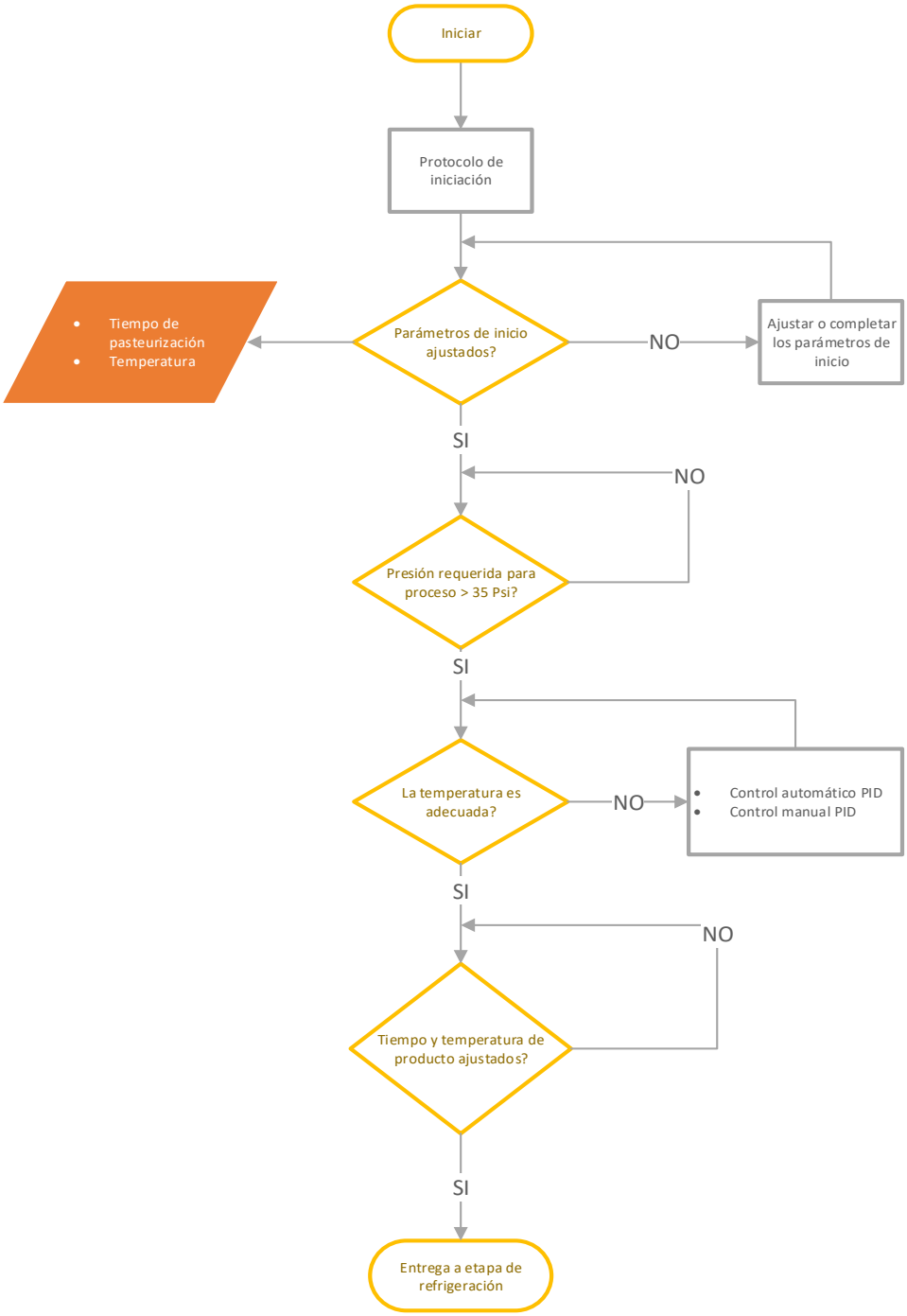


Ilustración 55 Diagrama de flujo, programación PLC

Una vez llevado a cabo este procedimiento toma acción el PLC Allen Bradley el cual ajusta los parámetros del controlador mediante un algoritmo (ilustración 55) que utiliza una ecuación en diferencias, derivada de la función discreta.

5.2.9 Implementación de la supervisión de sobre-presión.

El sistema está dotado de un sistema de protección de sobre-presión para mantener niveles seguros dentro del laboratorio.

Para esta labor se siguió la metodología GEMMA (Guía de estudios de modos de marcha y parada). Es un método muy eficaz para sistematizar los estados posibles que puede presentar un sistema a automatizar y las transiciones para pasar de uno a otro. Los más importantes son los procesos de: parada, funcionamiento y defecto.

La supervisión debe considerar prioritario la detección de los posibles defectos de la parte operativa y el ejecutar la parada de emergencia. Asimismo, una cuestión fundamental es el rearme del sistema, debiendo contemplar el caso de que la producción deba continuar en el estado previo a la emergencia, o si ya no es posible continuar, el proceso debe ser iniciado de nuevo. [9]

La guía GEMMA (Guía de Estudio de los Modos de Marcha y parada), es una representación organizada de todos los modos o estados (ilustración 56) en que se puede encontrar un proceso de producción automatizado, igualmente representa los saltos o transiciones que se dan de un estado a otro. La GEMMA y el GRAFCET se complementan, permitiendo una descripción progresiva del automatismo de producción. [9]

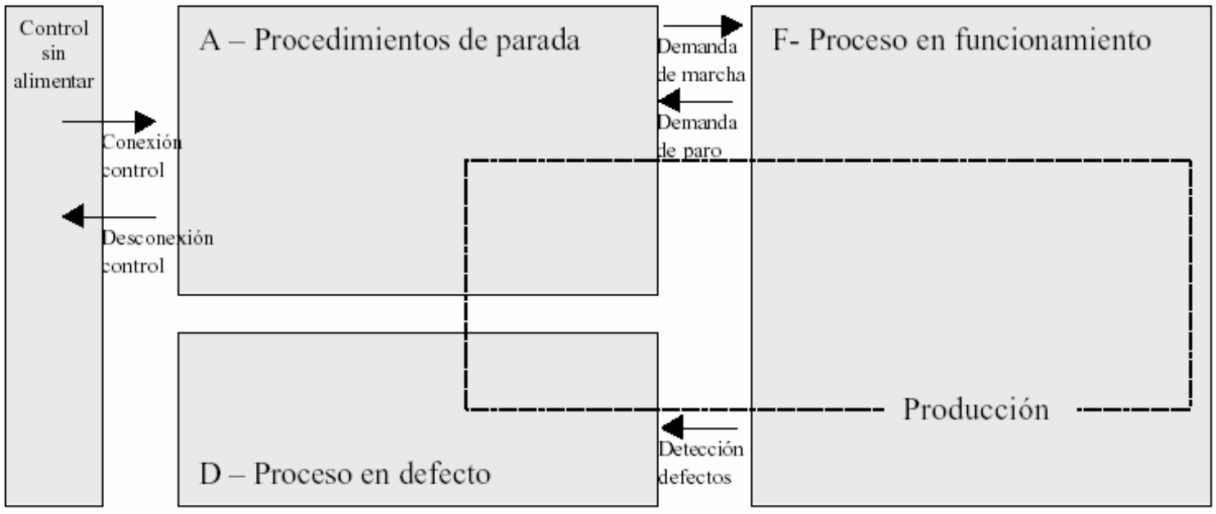


Ilustración 56 Modos de funcionamientos básicos

5.2.9.1 Paro de Emergencia

El sistema está funcionando normalmente (F1) y se presenta sobre-presión, entrando en parada de emergencia, se señaliza en el HMI (ilustración 58) indicándonos los valores de presión y temperatura. Esto ocasiona que se corte el suministro de energía hacia la resistencia (apertura del contactor), permitiendo que se suspenda la producción de vapor y así dejando en posición segura la presión.

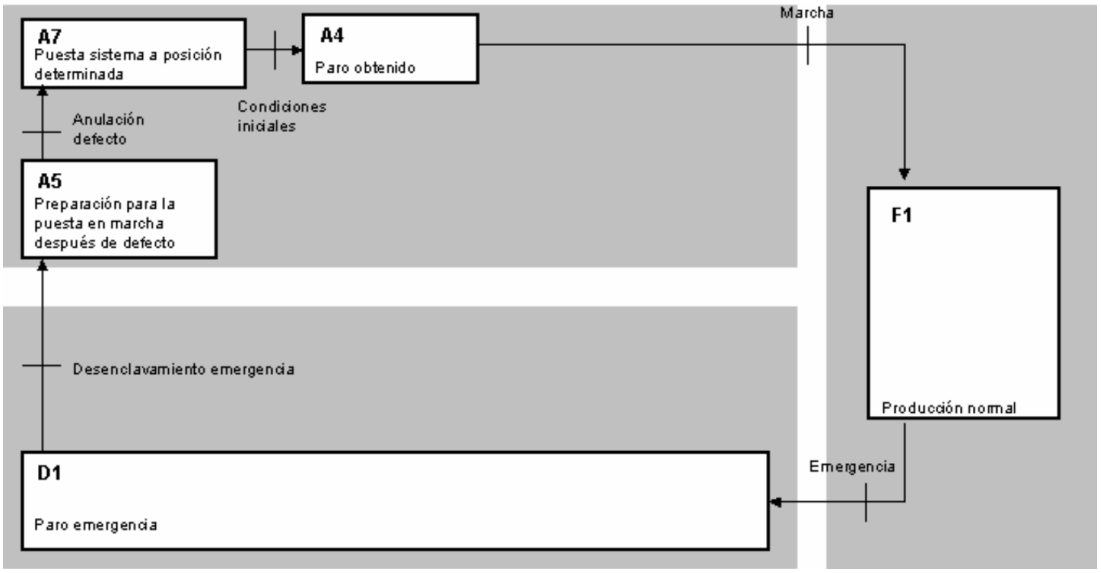


Ilustración 57 Paro de emergencia guía GEMMA

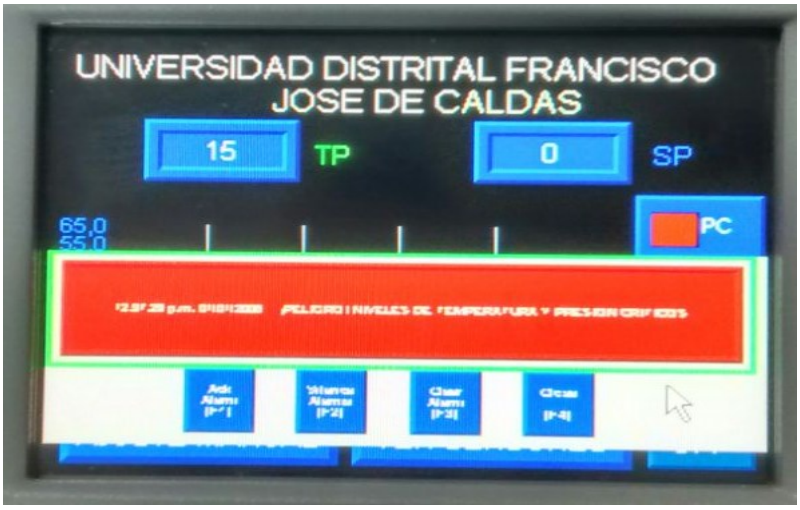


Ilustración 58 Señalización paro de emergencia HMI

El operario de la caldera liberara vapor por el ducto de alivio (ilustración 59), accionando la válvula hasta que los niveles de presión sean seguros.

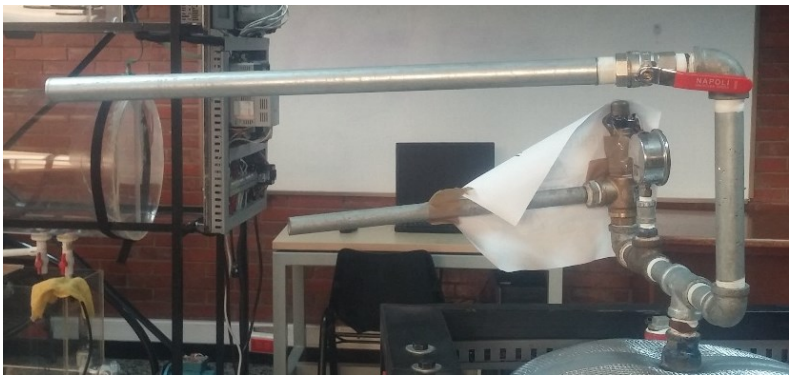


Ilustración 59 Ducto de alivio

El paro de emergencia se sostiene hasta que los niveles de presión sean seguros (D1), al desenclavar la emergencia se pasa a preparar la puesta en marcha (A5).

Se lleva al sistema hasta un estado determinado (A7), en nuestro caso cerrar contactor para que la resistencia entre en operación y continúe la producción de vapor.

una vez en el estado (A4), el sistema espera la continuación del funcionamiento que se producirá cuando el operario pulse el botón de arranque (en el HMI) que hará continuar el proceso (F1) a partir de la etapa en la que se encuentre.

Implementación de la metodología de automatización por proceso BATCH



Ilustración 60 Modelo de proceso del estándar ISA88

Se define una automatización por lotes debido a las características del proceso, ya que solamente se puede realizar pasteurización a una cantidad limitada de producto a la vez (entre 8-15 Litros) , la automatización define una serie de pasos para llevar a cabo la etapa de calentamiento del producto, en un primer paso se define llenar la caldera con agua (ilustración 62) una vez alcanzado el nivel requerido se detiene el bombeo de agua y se inicia la etapa de calentamiento activando la resistencia (ilustración 63), alcanzada la temperatura y presión requeridas por el sistema y determinadas experimentalmente como se menciona en la sección 5.2.7. paralelamente se está ejecutando la arquitectura de supervisión, mencionada en la sección 5.2.9, mientras los parámetros de seguridad se encuentren dentro de los límites normales de operación se pasa a los modos de control (Automático y manual) (ilustración 64), con la temperatura de producto alcanzada y después del tiempo requerido (15Min) para este tipo de pasteurización se finaliza el proceso de control

(ilustración 66) y se envía la señal a la etapa de enfriamiento para la continuación del proceso de pasteurización.

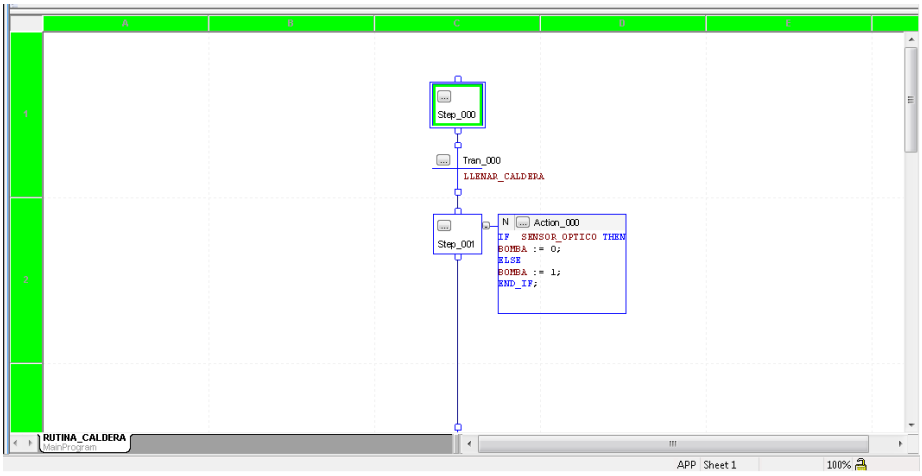


Ilustración 61 etapa de proceso Inicio

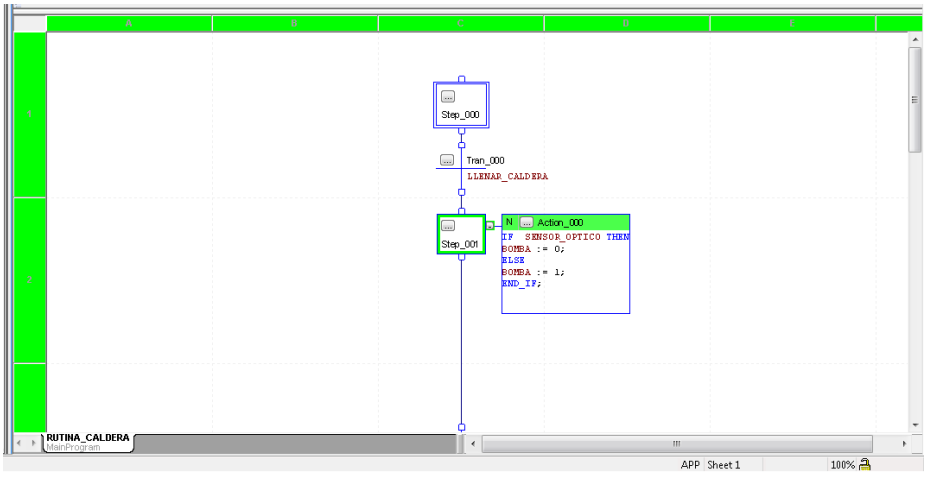


Ilustración 62 etapa de proceso llenado de caldera

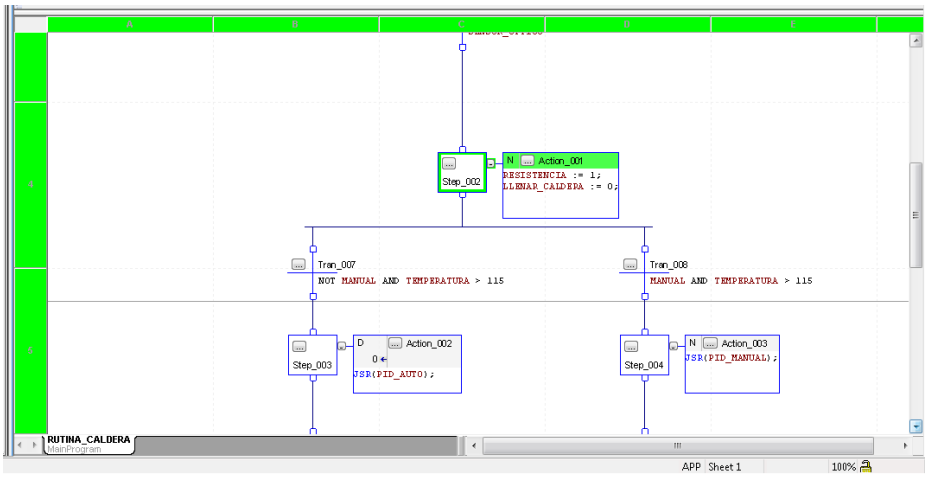


Ilustración 63 etapa de proceso Calentamiento

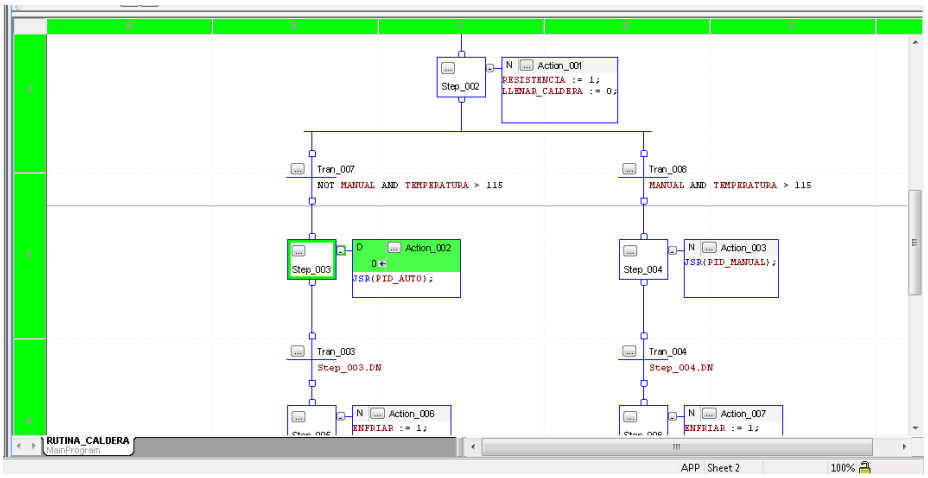


Ilustración 64 etapa de proceso modos de control

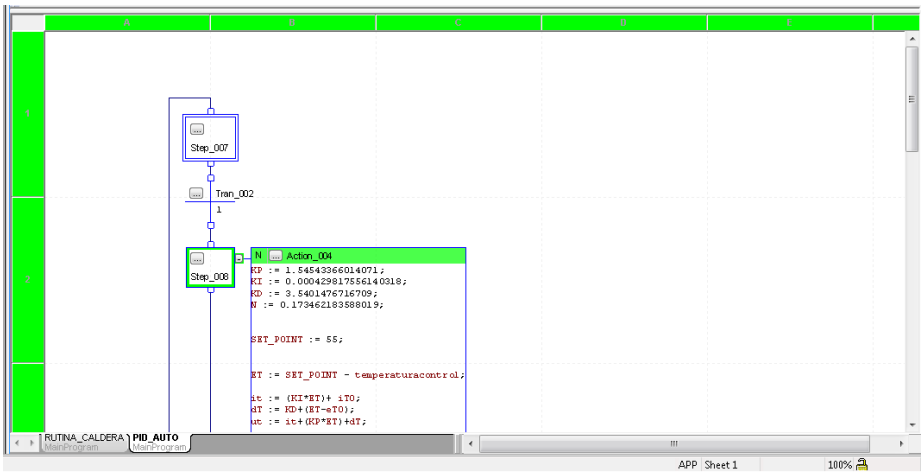


Ilustración 65 Parámetros automático

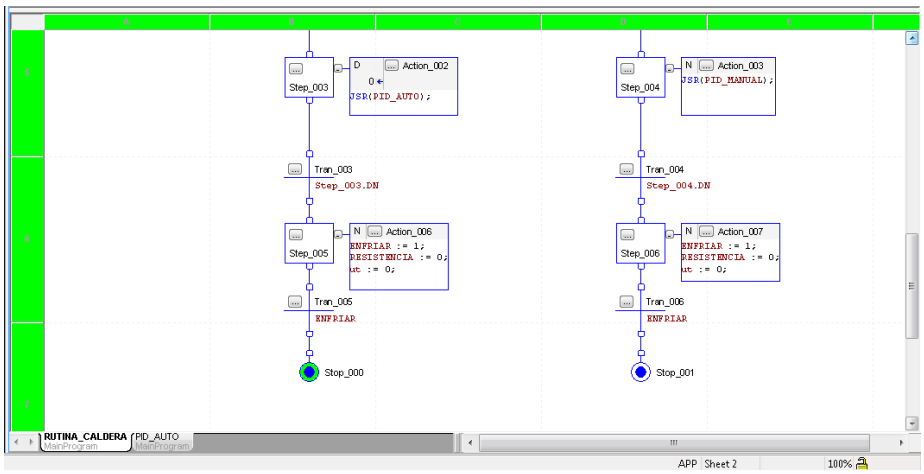


Ilustración 66 Fin del proceso

6 Resultados

Como se había expresado anteriormente en la sección 5.2.7, la elección de un controlador de primer orden obedece a que, si la temperatura de proceso supera la referencia, el controlador envía la señal de cierre a la válvula negando el paso de vapor. El descenso de temperatura es muy lento (ilustración 67), debido a que la disipación de calor se hace de forma natural sin la intervención de la válvula ni el controlador.



Ilustración 67 respuesta de caída de temperatura

La escala de tiempo en el panel es de 5min. Por cada partición, este experimento pretendía sobrepasar la temperatura 2 grados Celsius, a fin de corroborar el tiempo de retorno al valor de la referencia, se observó que se tardó cerca de 8min en disminuir los dos grados Celsius y llegar a la referencia, además el tiempo que tomo en disminuir 4 grados Celsius es de aproximadamente 30min, por lo cual la temperatura no debe sobrepasar la referencia, para cumplir esto el controlador debe llevar al sistema a un comportamiento de primer orden.

El controlador implementado presenta una respuesta de primer orden (ilustración 68), con lo cual aseguramos un sobre impulso nulo, a fin de mantener la referencia.



Ilustración 68 respuesta del controlador en HMI

El controlador se desarrolló a partir de la función de transferencia discreta obtenida de la identificación experimental. El software studio 5000 cuenta con un bloque PID, el cual tiene implícita una función de transferencia propia desconocida; al configurar este módulo con los parámetros KP, KI y KD el comportamiento del controlador se ve afectado por esta función de transferencia. Al configurar un controlador desarrollado mediante ecuaciones en diferencias con los parámetros mencionados (ilustración 69) el comportamiento es as acorde al resultado obtenido mediante simulación.

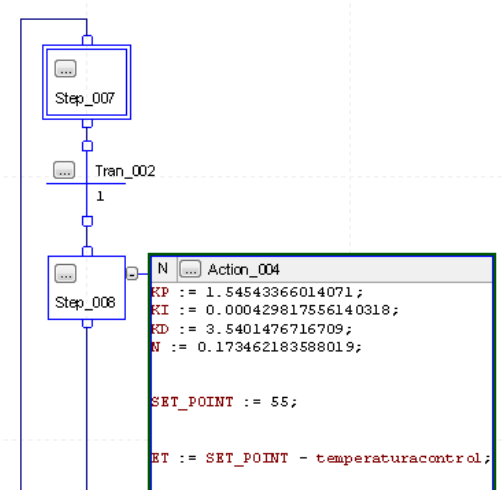


Ilustración 69 Constantes del controlador

A partir de las pruebas realizadas se observó un tiempo de estabilización del sistema cercano a los 5 min., además de los 15 min. Que requiere el proceso de pasteurización por bloques, lo cual llevo a la determinación de disminuir las escalas de la gráfica (ilustración 70).



Ilustración 70 grafica con escala ajustada

En la supervisión se implementó alarmas que nos indicaran cuando se produzcan eventos de seguridad (ilustración 71) con esta implementación se consigue aumentar los niveles de seguridad del sistema haciéndolo más apto para la utilización en el laboratorio de la universidad.



Ilustración 71 main con indicadores de alarmas

Para que la supervisión sea adecuada el indicador de alarmas se mantiene en los menús de main y vista de sensores, este indicador está compuesto por PC=presión critica, TC=temperatura crítica, NCB=nivel caldera bajo, NTB=nivel tanque bajo (tanque de reserva de agua), si y solo si la presión es crítica y la temperatura es crítica se activa la alarma y se detiene el proceso apagando la resistencia, de lo contrario solo se activan los indicadores.



Ilustración 72 menú datos de sensores con indicadores de alarmas

7 Conclusiones

- La energía proporcionada por la resistencia en forma de calor según la ley de joule dio como resultado 10557.4 kJ. A partir de las mediciones y de presión, temperatura y nivel del agua (con o cuales se calcularon los volúmenes y a partir de ahí los volúmenes específicos y finalmente las entalpias) se pudo obtener por medio de la primera ley la energía suministrada al agua es de Q = 2897.72 kJ. El signo positivo indica que se suministró calor al sistema. Esto indica que la mayoría de energía suministrada al sistema no se emplea en un cambio de fase del agua y por el contrario se pierde en el cuerpo de la caldera.

- Debido a las grandes pérdidas de energía en el cuerpo de la caldera y el ambiente se opta por instalar un recubrimiento que actúe aislamiento el cual además de servir como protección para el personar que manipula la planta, ayudó a mejorar los tiempos de producción de vapor, reduciendo las pérdidas de calor.

- Se esperaba una disminución del nivel del agua en la medida en la que se generara más vapor y aumentara la presión, sin embargo, el nivel del agua por el contrario aumento hasta un cm más en el estado final. Los datos obtenidos de la simulación muestran en el estado dos un aumento en la densidad del gas y a su vez una disminución de la densidad del líquido, con lo que el volumen que ocupa el gas disminuye mientras que el que ocupa el líquido aumenta, esta es la razón del incremento en el nivel del agua en el indicador.

- Al realizar el cambio de resistencia sumergible tipo baño de maría de 2.500 watts a resistencia externa tipo industrial de 2.500 watts, se mejoró la eficiencia en un 65% pasando de un tiempo de producción de vapor de 8 horas a 220V a 1,5 horas a 220V.

- Debido a que se desarrolló el control PID mediante ecuación en diferencias y no por medio del bloque PID que incluye el studio 5000, la respuesta del controlador es más rápida teniendo un comportamiento de primer orden como se pretendía ya que dicha ecuación se obtuvo a partir de la función de transferencia determinada por medio de la identificación experimental y que representa comportamiento del sistema.

8 Practicas

8.1 Practica 1.

8.1.1 Puesta en marcha de la caldera.

Teniendo en cuenta los pasos que se deben seguir para la puesta en marcha de la caldera el estudiante o grupo de estudiantes deben identificar mediante el esquema P&ID las partes de la caldera y anotarlas en la siguiente hoja:

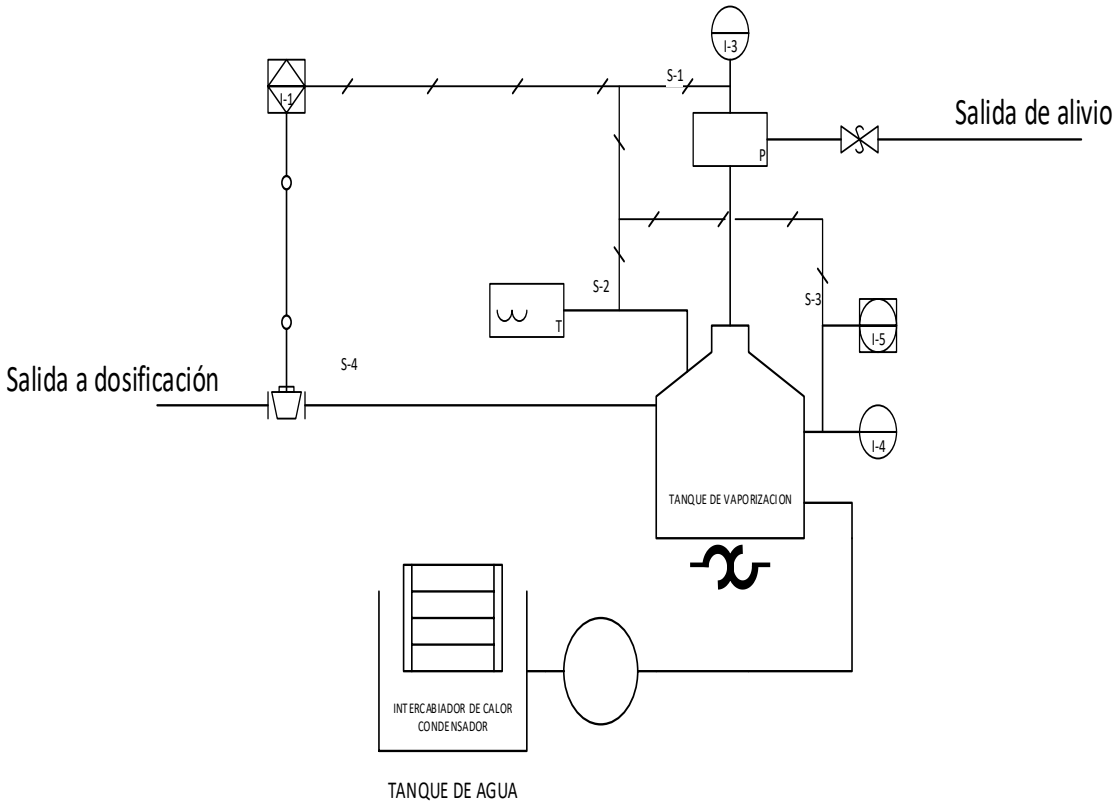


Ilustración 73 plano P&ID para completar

Una vez identificadas las partes se inicia con la puesta en marcha, de la siguiente manera:

Estos pasos están definidos para un satisfactorio arranque, tanto de seguridad como de operación.

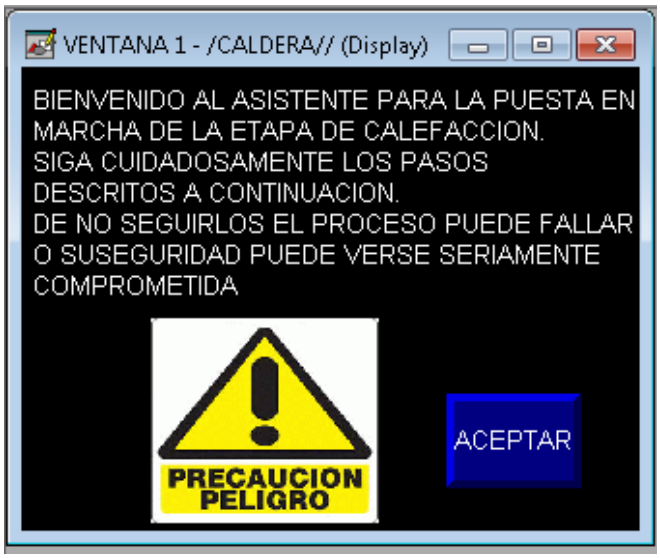


Ilustración 74 pantalla de bienvenida

1. Realice la conexión a fuentes de energía de 110V como de 220V paso 1 (ilustración 59), para esto, identifique los cables de alimentación correspondientes, guiarse por las ilustraciones 60 y 61 (clavijas de conexión de 110V y 220V) y conecte a las tomas.

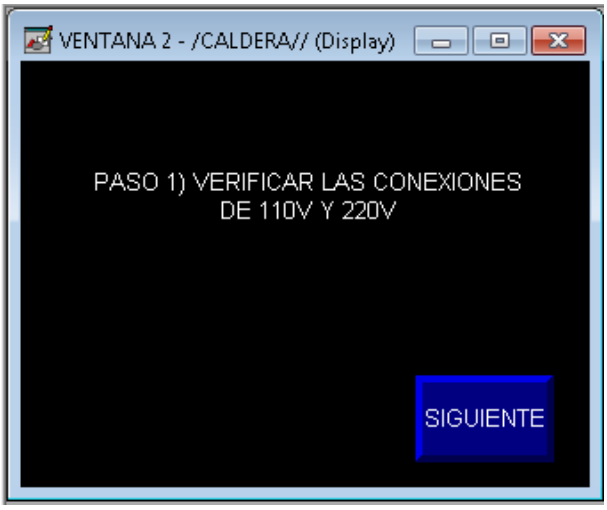


Ilustración 75 pantalla de paso 1



Ilustración 76 conexión 110V



Ilustración 77 conexión 220V

2. Verificar que la válvula de purga del tanque se encuentre cerrada, mientras se encuentra en este paso ver iliustracion 62, y ya previamente identificada la válvula tanto en el P&ID como físicamente, proceder a verificar que se encuentra cerrada (posición horizontal) ver ilustración 63.



Ilustración 78 pantalla paso 2



Ilustración 79 válvula de purga cerrada

3. Verificar que la válvula de salida de vapor se encuentre cerrada, mientras se encuentra en este paso ver ilustración 64, y ya previamente identificada la válvula tanto en el P&ID como físicamente, proceder a verificar que se encuentra cerrada (posición horizontal) ver ilustración 65.



Ilustración 80 pantalla paso 3



Ilustración 81 válvula salida de vapor cerrada

4. Realizar apertura de la válvula de alivio, mientras se encuentra en este paso ver ilustración 66, y ya previamente identificada la válvula tanto en el P&ID como físicamente, proceder a realizar apertura (posición vertical) ver ilustración 67.

Nota: Este paso es muy importante para llevar un control sobre la presión que aumentara a medida que se produce vapor.



Ilustración 82 pantalla paso 4



Ilustración 83 válvula de alivio abierta

5. Proceso de llenado del tanque de vaporización, presionar botón llenar caldera ver ilustración 68, esperar hasta que el indicador pase de rojo a verde ver ilustración 68, una vez este en verde, el tanque ya posee la cantidad suficiente de agua para poder oprimir botón siguiente y continuar con la inicialización.

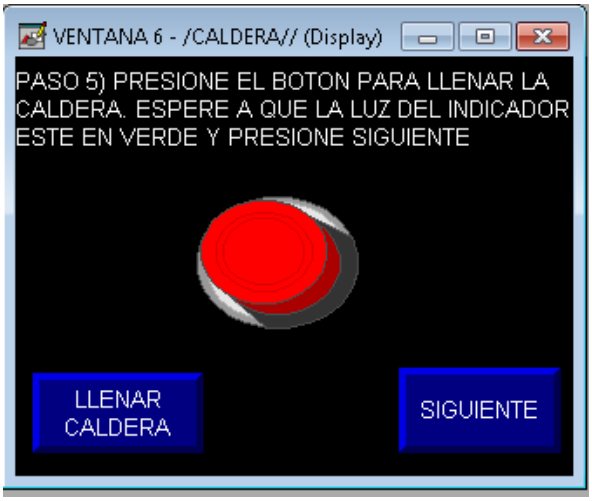


Ilustración 84 pantalla paso 5

6. Proceso de generación de vapor ver ilustración 78, esperar un tiempo hasta que se vea vapor por el ducto de salida de alivio, ver ilustración 79, una vez esto suceda proceder a cerrar la válvula de alivio ver ilustración 80.



Ilustración 85 pantalla paso 6

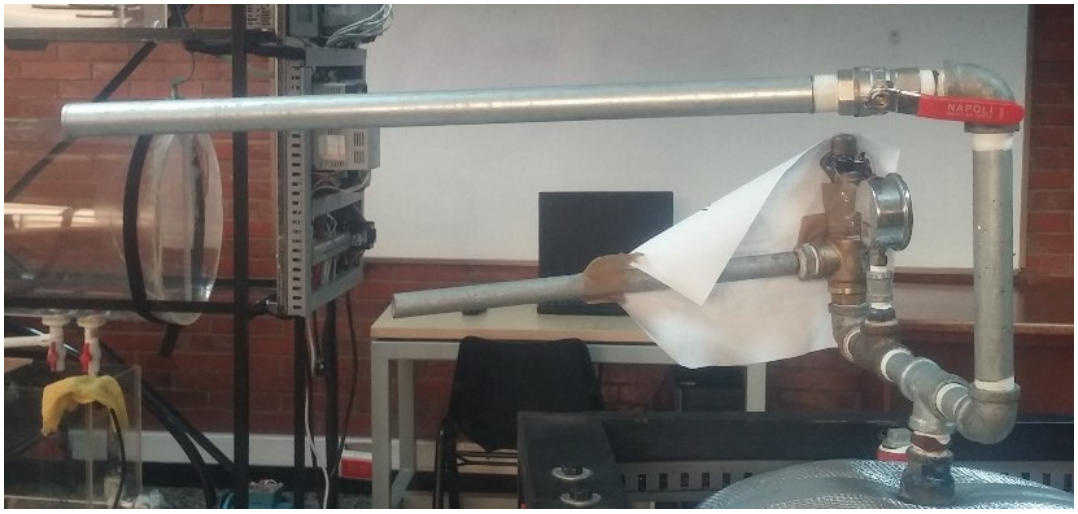


Ilustración 86 ducto de alivio

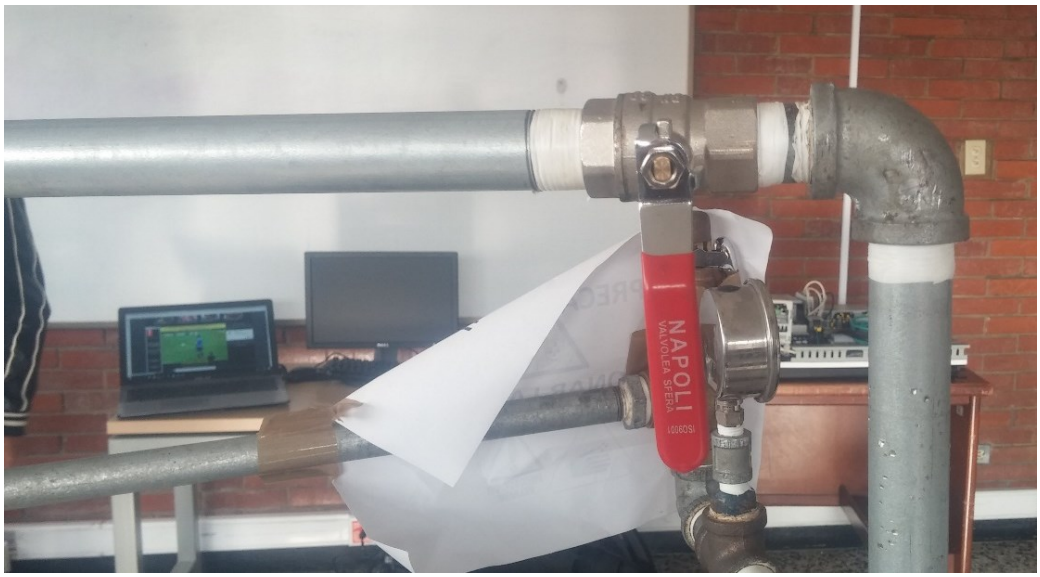


Ilustración 87 válvula de alivio

7. Realizar conexión de mangueras de distribución de vapor (ilustración) hacia la etapa de dosificación, como la manguera de realimentación de agua caliente (ilustración) proveniente de la etapa de dosificación.



Ilustración 88 salida de vapor de la válvula hacia dosificación



Ilustración 89 conexión salida de vapor caldera - dosificación



Ilustración 90 conexión realimentación de agua dosificación - tanque reserva



Ilustración 91 manguera realimentación de agua dosificación - tanque de reserva

8. Al cerrar la válvula de alivio, puesto que ya hay producción de vapor y se encuentran conectadas las mangueras de distribución de vapor como de realimentación de agua caliente, se procede a realizar la apertura de la válvula de salida (ilustración 81).



Ilustración 92 Válvula de salida

8.2 practica 2

Variación de parámetros PID y visualización de la respectiva respuesta

Para esta práctica se requiere del software Matlab®, una vez corriendo el software procedemos a abrir Simulink para crear los bloques que vamos a utilizar para desarrollar la práctica.

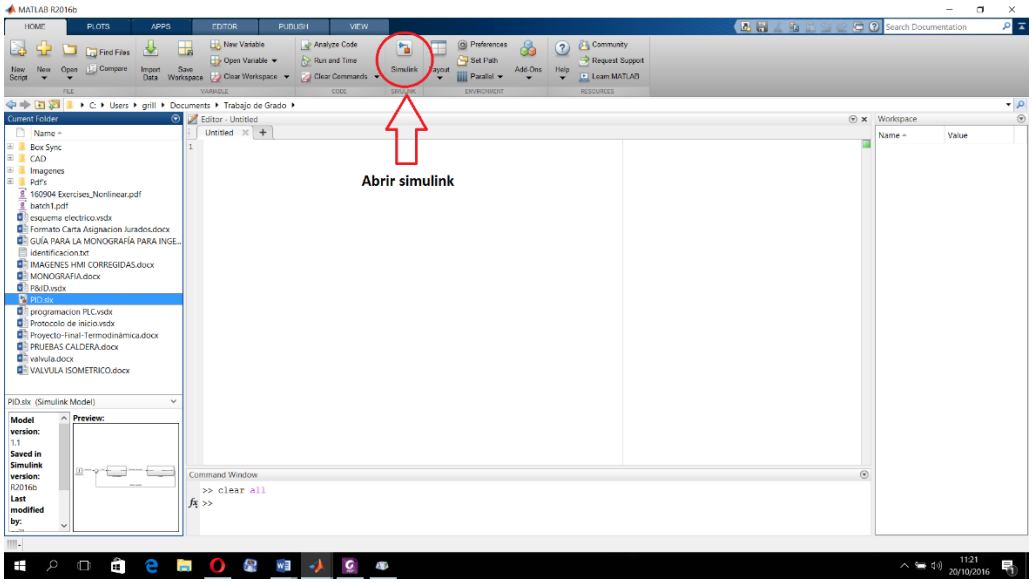


Ilustración 93 abrir simulink

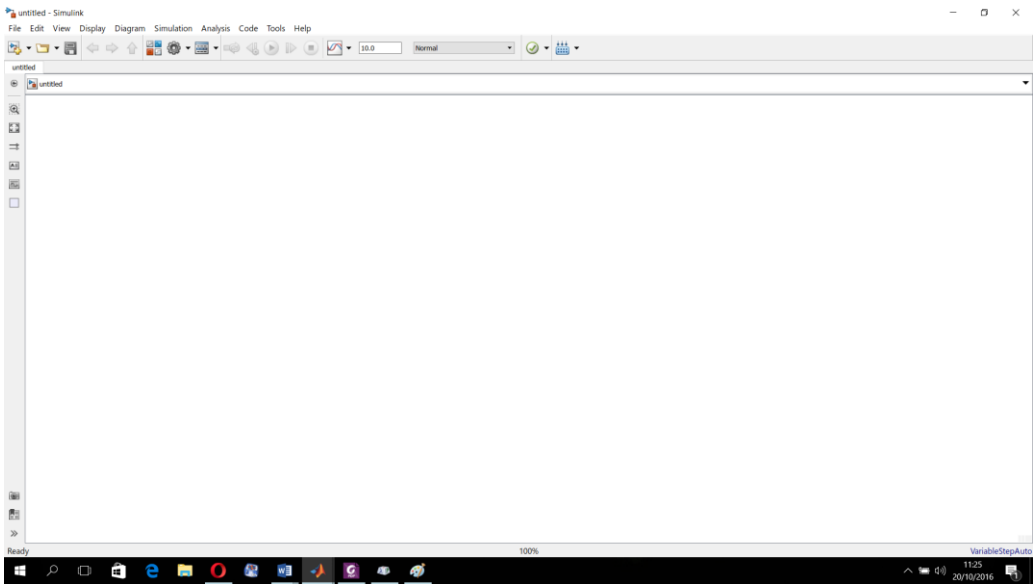


Ilustración 94 ventana simulink

Abrimos la biblioteca de bloques de simulink.

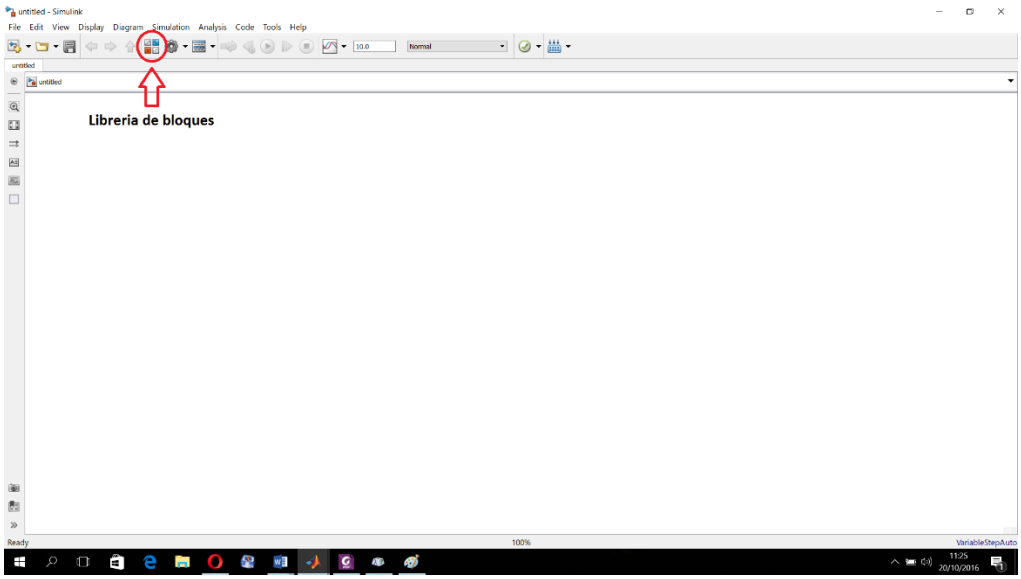


Ilustración 95 abrir librería

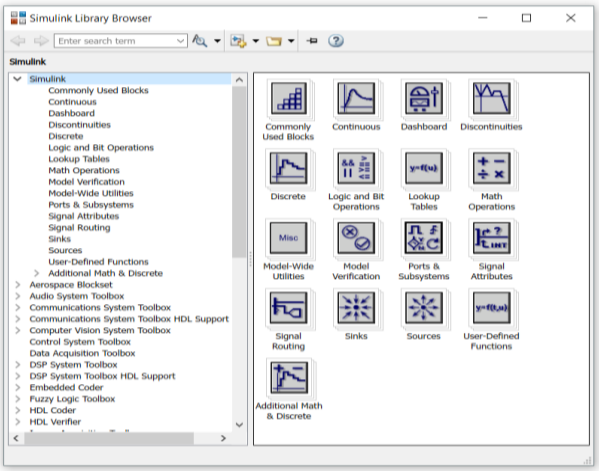


Ilustración 96 ventana de la librería

En la librería ubicamos el bloque llamado step, el cual nos generara la señal paso que le inyectaremos al sistema.

Este bloque se encuentra en simulink/sources.

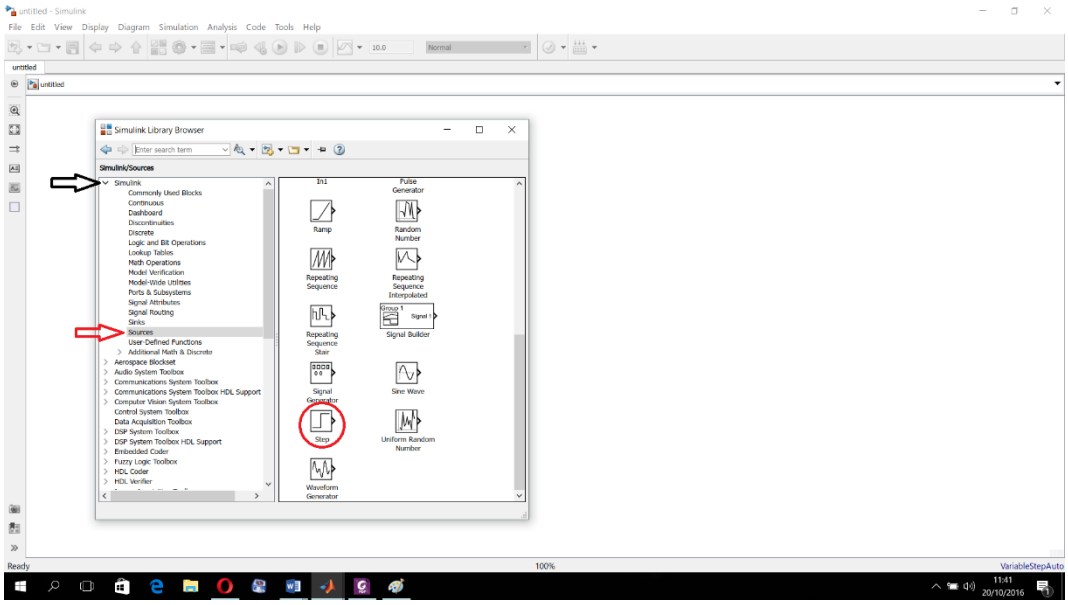


Ilustración 97 bloque step

Para realizar la resta de las señales de referencia o señal paso y la señal de error proveniente del control realizado al sistema ubicamos un sumador (sum).

Se ubica este bloque en simulink/math operations/sum

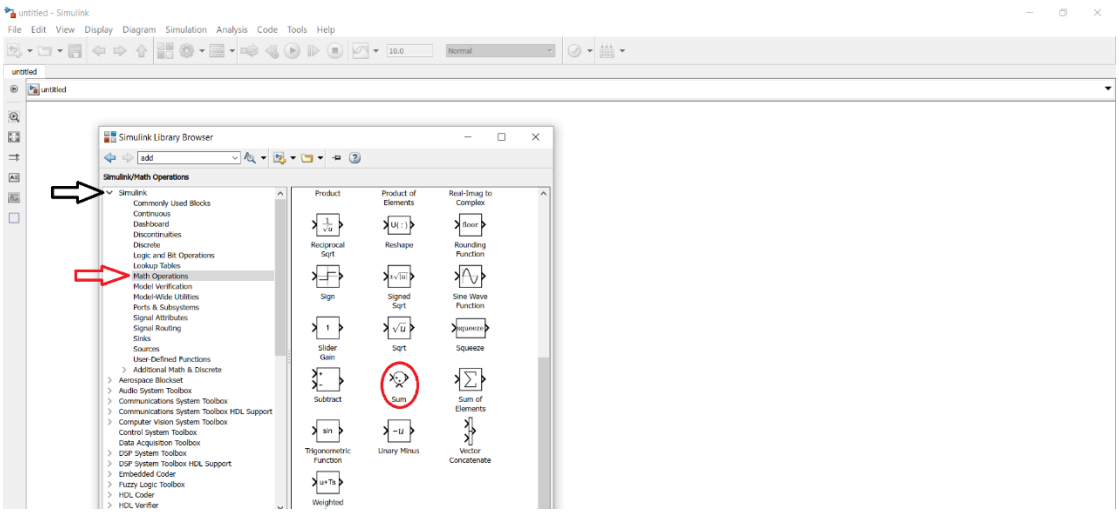


Ilustración 98 bloque sum

Ahora vamos a ubicar el bloque PID, el cual contendrá los parámetros kp, ki, kd, los que vamos a variar y observar la respuesta del sistema a estos cambios.

Este bloque se encuentra en simulink/continuous/PID controller.

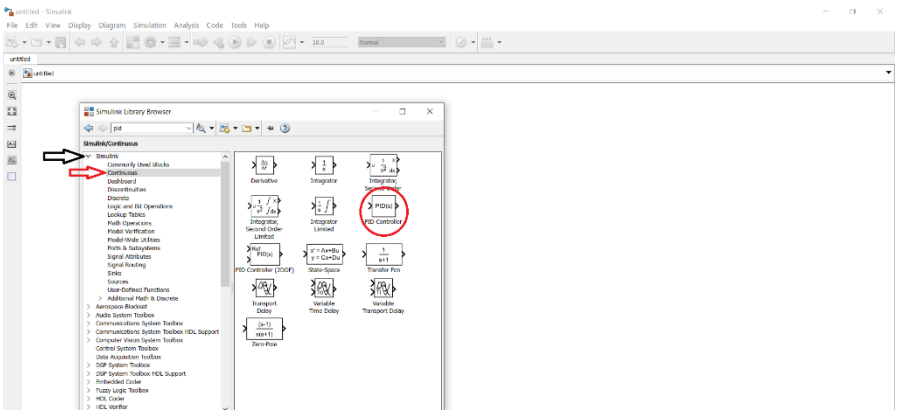


Ilustración 99 bloque PID

La señal proveniente del controlador PID necesita un retardo, para esto insertamos el bloque denominado transport delay.

Este bloque se encuentra ubicado en simulink/continuous/transport delay

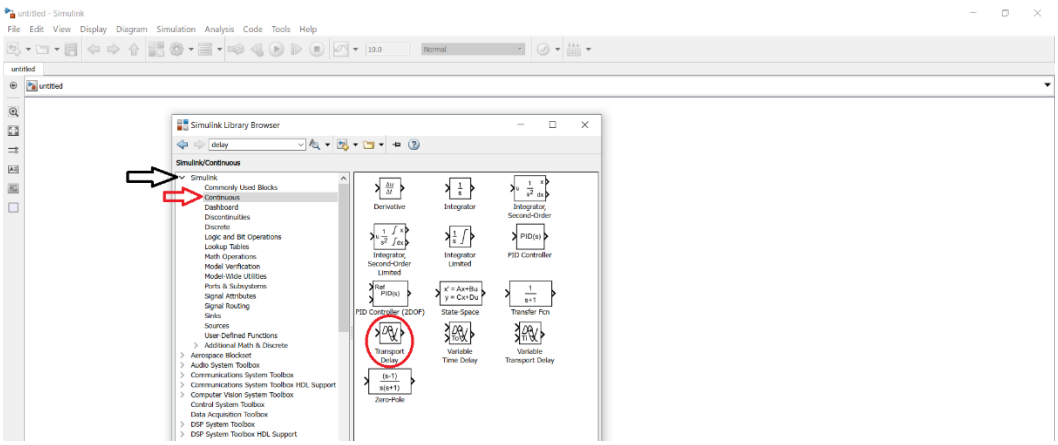


Ilustración 100 bloque transport delay

El bloque que nos simulará el comportamiento de la caldera, ya que está constituido por la función de transferencia, esta función de transferencia se encuentra en el dominio de la frecuencia (transformada de Laplace), es el bloque denominado transfer function.

Para ubicar este bloque nos dirigimos a simulink/continuous/transfer fcn

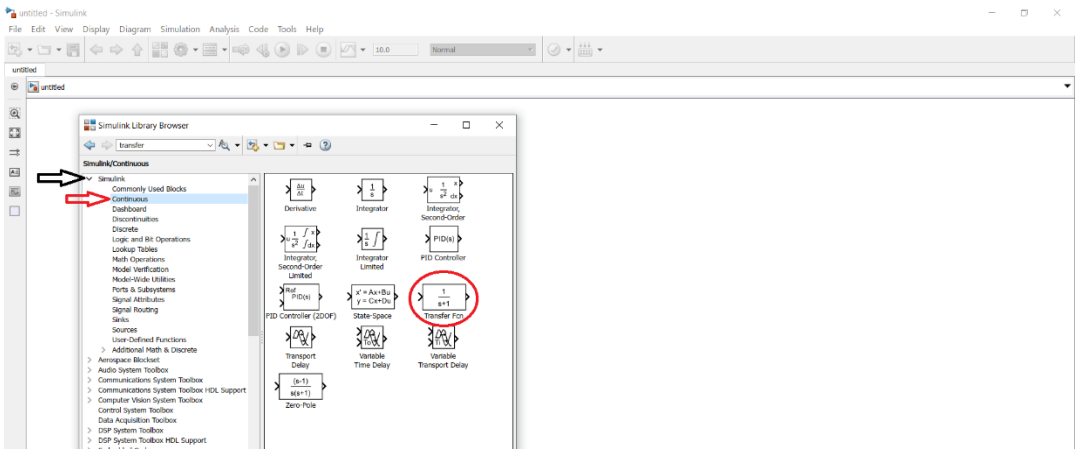


Ilustración 101 bloque transfer fcn

Por ultimo para visualizar la señal que arroja el sistema colocaremos el bloque para esta función el cual se denomina scope.

Este bloque se encuentra en simulink/commonly used blocks/scope

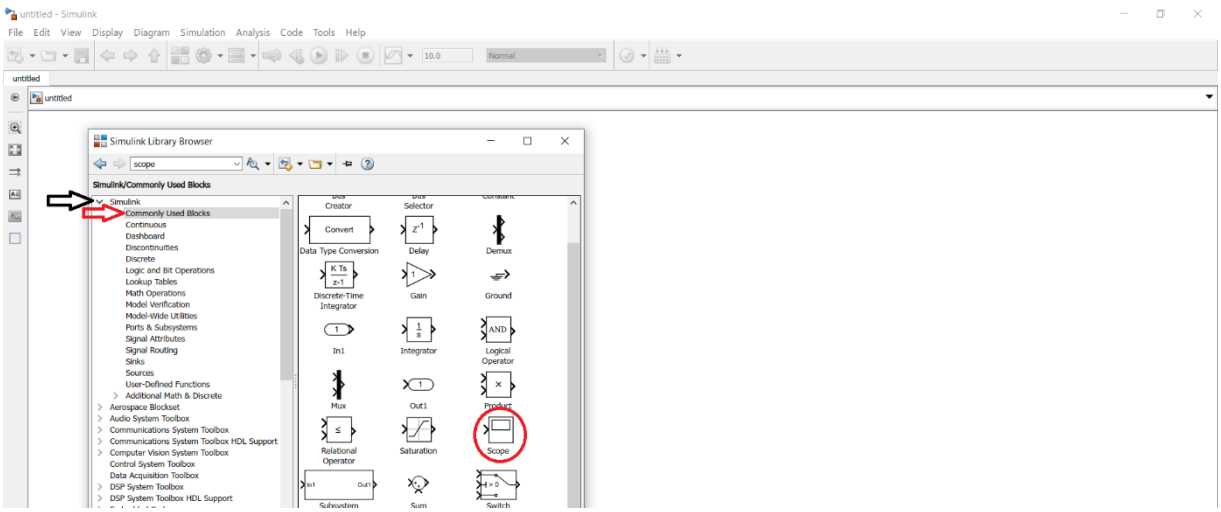


Ilustración 102 bloque scope

En la ventana de simulink conectamos los bloques de la siguiente manera.

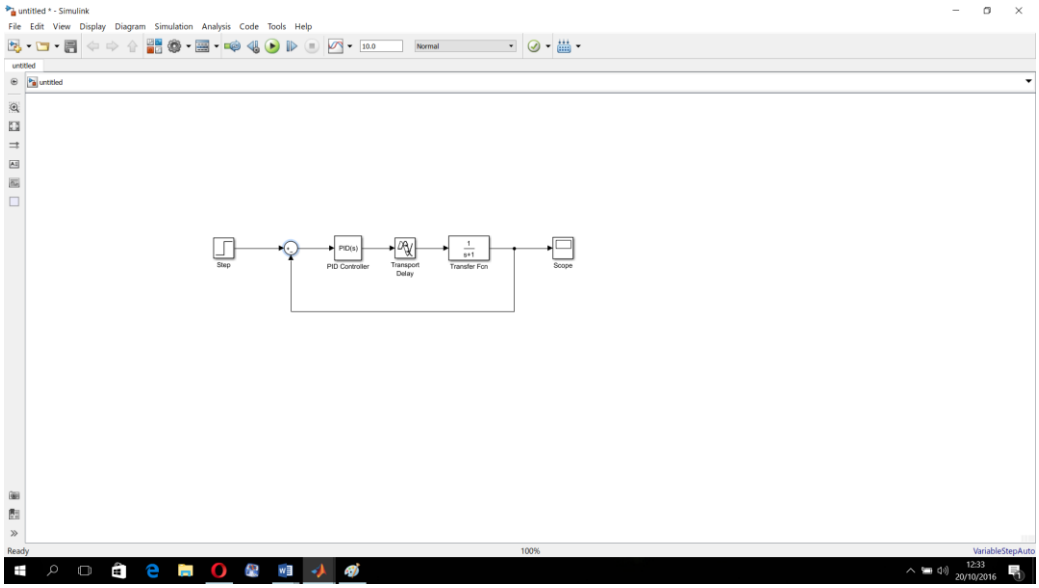


Ilustración 103 conexión de bloques

Para el correcto funcionamiento del sistema se realizan las siguientes configuraciones:

En el bloque de sum se cambia los signos para realizar la resta, dando doble click sobre el bloque sum, y configuramos de la siguiente manera:

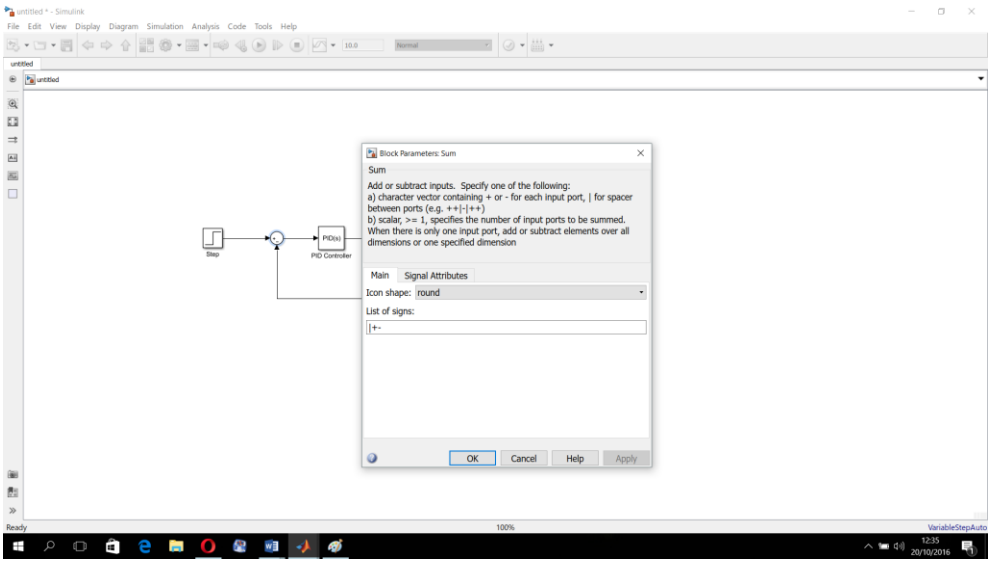


Ilustración 104 configuración bloque sum

En el bloque de transfer fcn, configuramos la función de transferencia dando doble click sobre el bloque y digitando la función de transferencia de la siguiente forma:

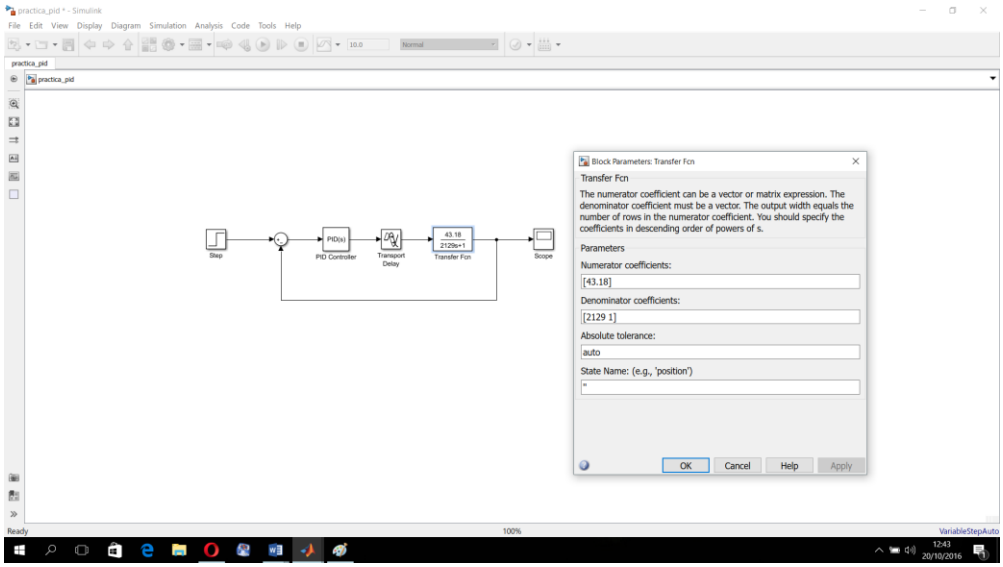


Ilustración 105 configuración bloque transfer fcn

Por ultimo donde vamos a realizar las variaciones de los parámetros kp, ki, kd, dando doble click sobre el bloque PID controller ingresamos a la siguiente ventana de configuración, la cual esta con los valores con los que se sintonizo el PID para la caldera:

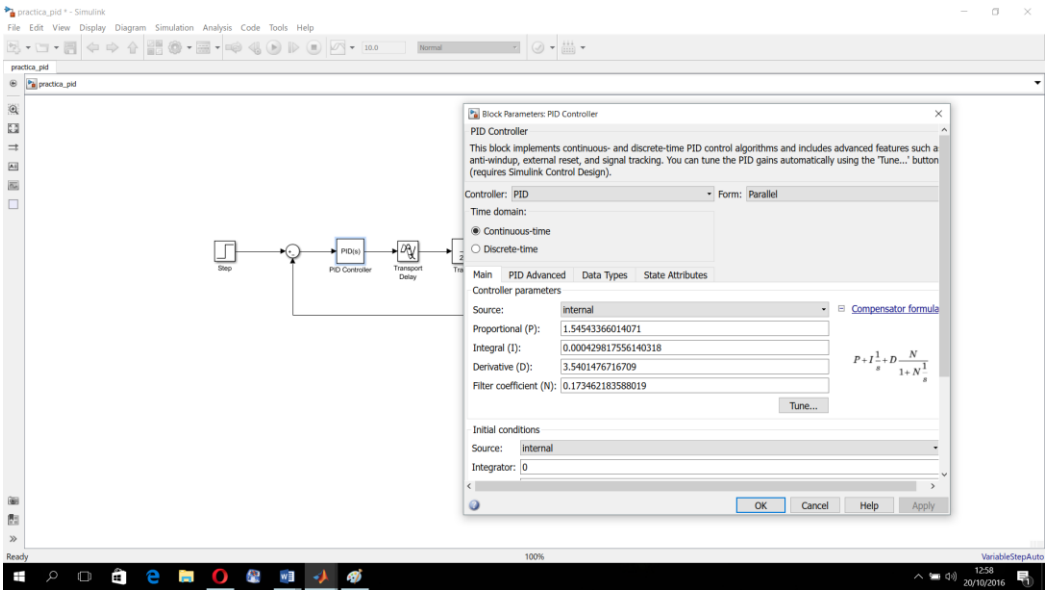


Ilustración 106 configuración del PID

Para la realización de la práctica se debe ingresar a esta ventana de configuración del controlador PID y cambiar los parámetros proporcional, integral y derivativo, observar la señal de salida e ir determinando en que forma modifica la respuesta del sistema y que tan convenientes son tomar ciertos valores, realizando una tabla en la que se especifique estos cambios.

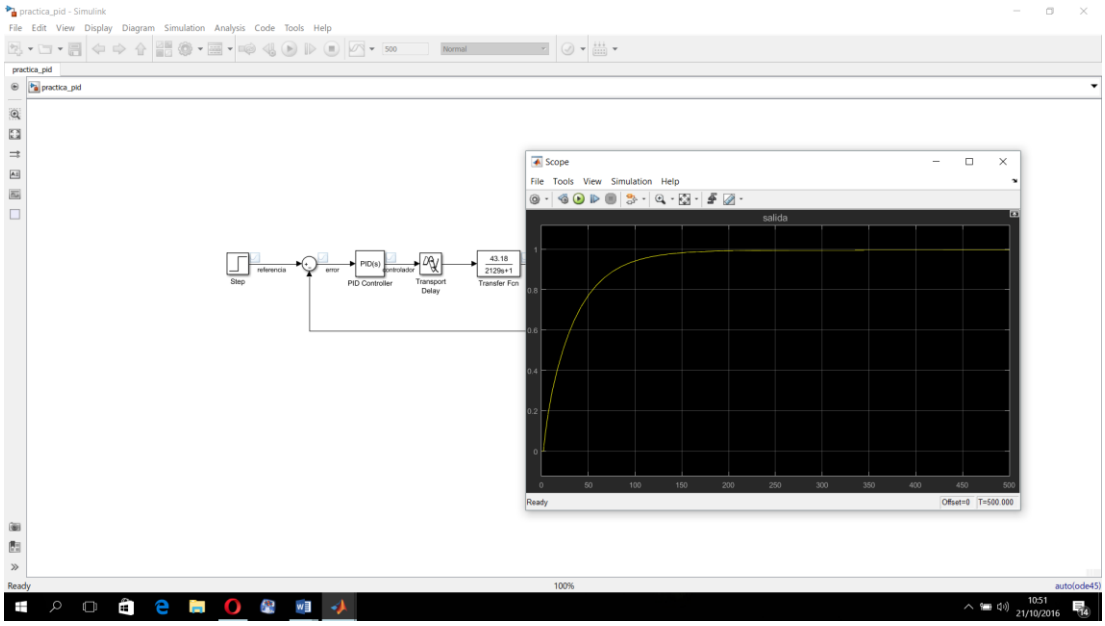


Ilustración 107 respuesta del sistema a los parámetros tuneados

Una vez se tienen datos del PID, introduciremos estos parámetros al PLC y observar el comportamiento de la caldera.

Vamos al menú principal en el HMI e ingresamos a manual (ilustración 89)

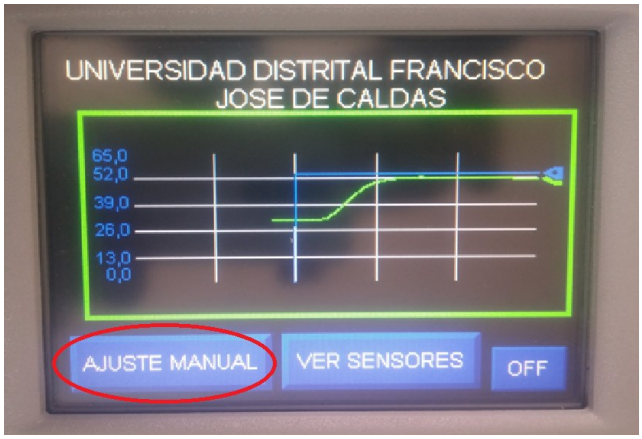


Ilustración 108 Menú principal HMI

En el menú manual ingresamos los parámetros correspondientes a KP, KI, KD respectivamente (ilustraciones 89, 90, 91).

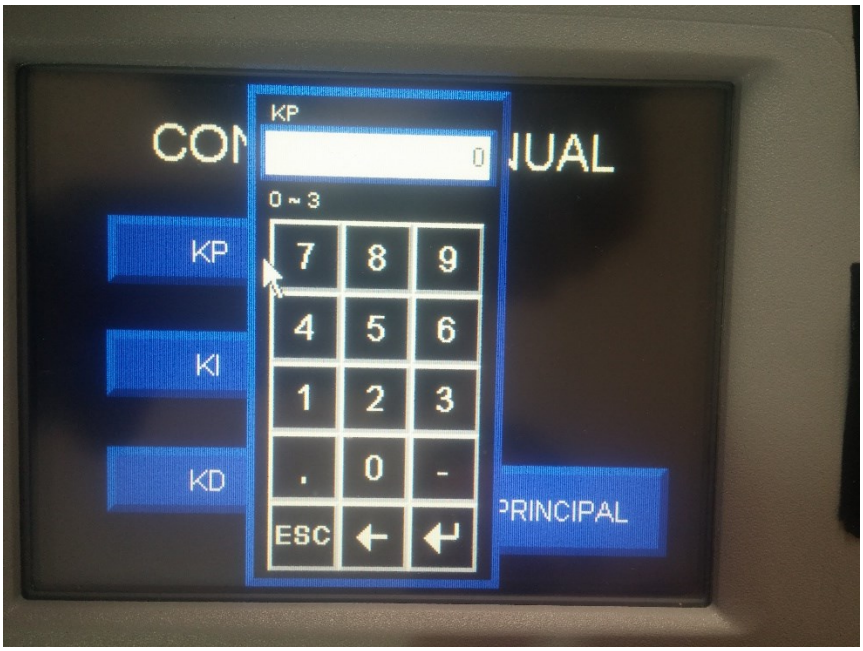


Ilustración 109 Parámetro KP

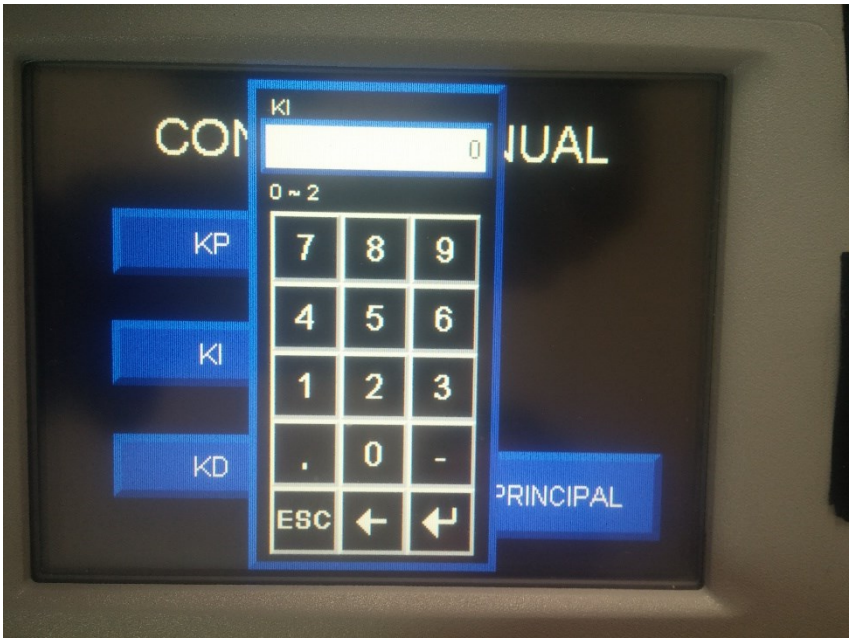


Ilustración 110 Parámetro KI



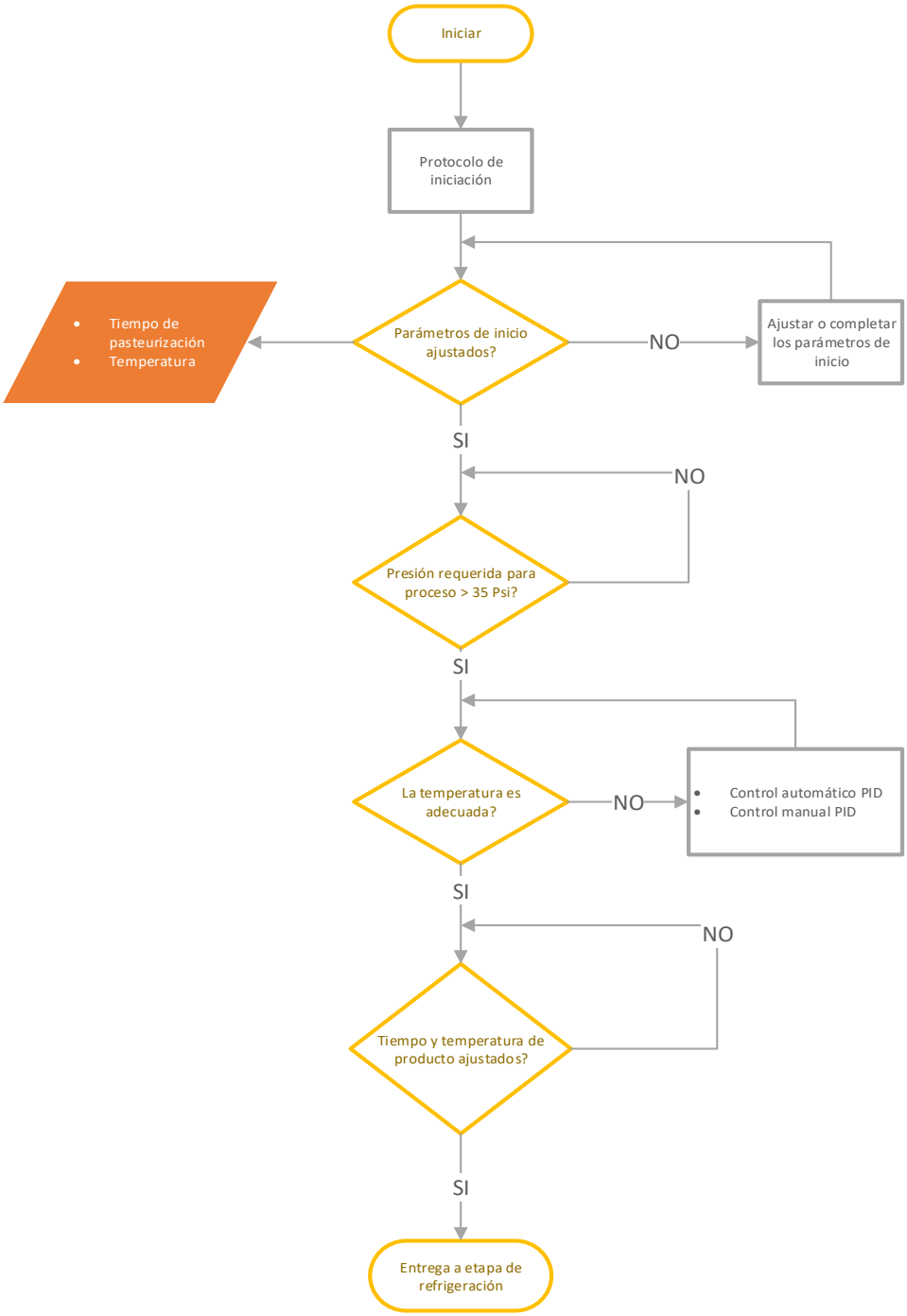
Ilustración 111 Parámetro KD

Comparar el comportamiento de la simulación con el comportamiento del controlador implementado en el PLC, y concluir.

Recomendaciones

1. Tener en cuenta el protocolo de seguridad ver anexos
2. Seguir los pasos para la puesta en marcha de la caldera bajo la supervisión del profesor.
3. finalizadas las practicas tener en cuenta las presiones residuales en las mangueras (tener precaución ya que puede quedar agua caliente con presión produciendo expulsión súbita de agua caliente).
4. Mantener distancias seguras con respecto a la caldera mientras este en uso debido sobre todo a las superficies calientes.
5. Nunca situarse en frente de los ductos de purga.
6. No accionar las válvulas mientras se esté en operación.
7. Después de conectada la válvula servo-accionada activar el interruptor ubicado cerca de la válvula y terminada la practica dejarlo en su posición inicial.
8. Seguir las recomendaciones del profesor.

ANEXOS
DIAGRAMA DE FLUJO PROGRAMACIÓN PLC



P&ID

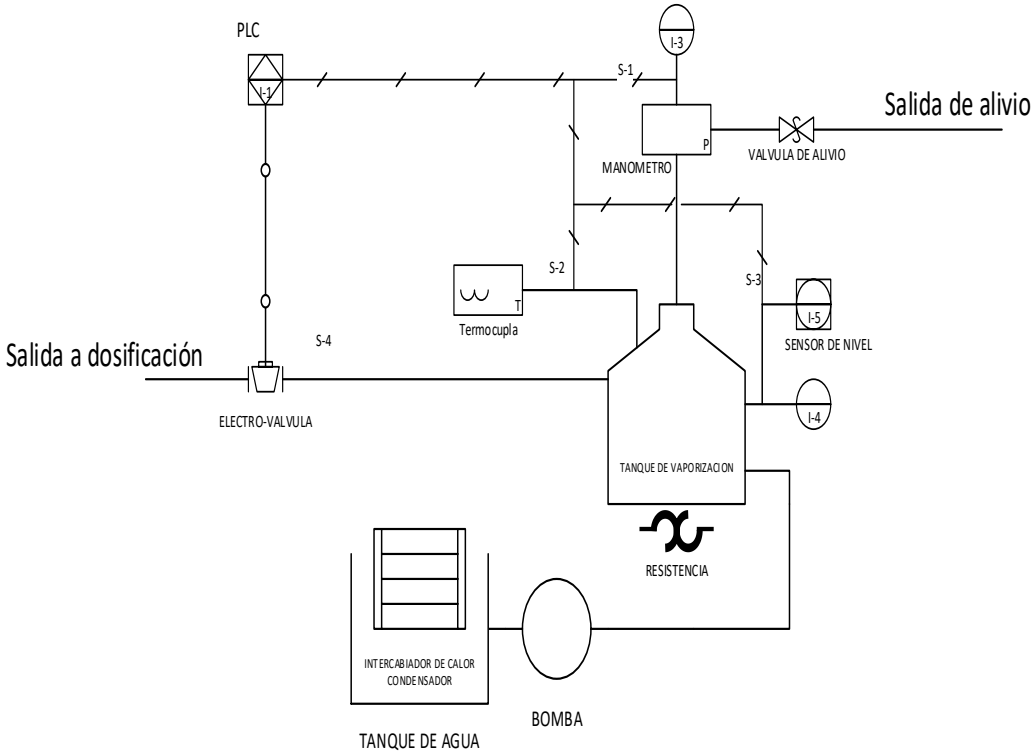

PLC
I-1
I-3
S-1
Salida de alivio
P
MANOMETRO
VALVULA DE ALIVIO
S-2
S-3
T
Termocupla
I-5
SENSOR DE NIVEL
Salida a dosificación
S-4
ELECTRO-VALVULA
I-4
TANQUE DE VAPORIZACION
RESISTENCIA
INTERCABIADOR DE CALOR
CONDENSADOR
BOMBA
TANQUE DE AGUA

DIAGRAMA ELECTRICO

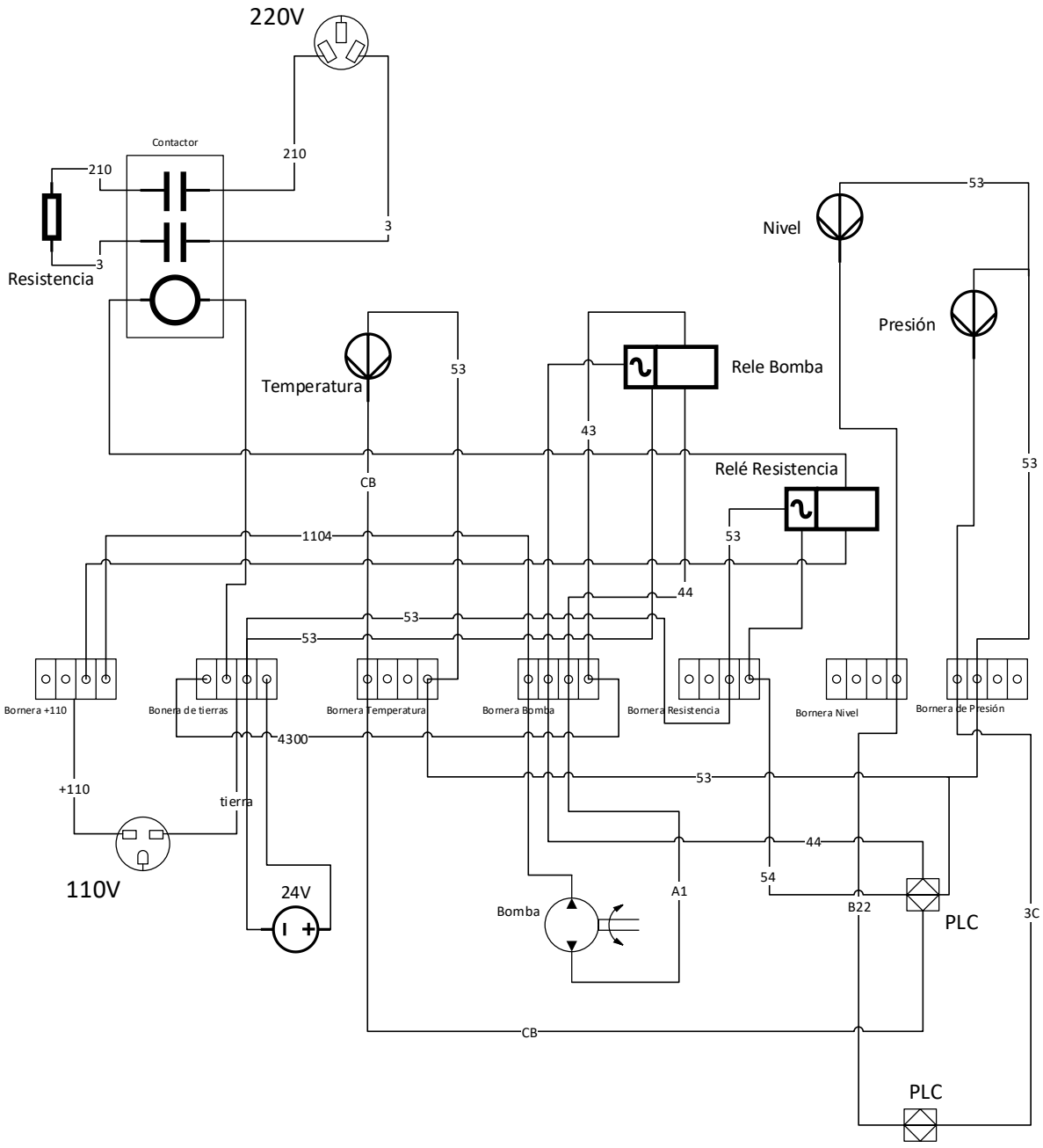
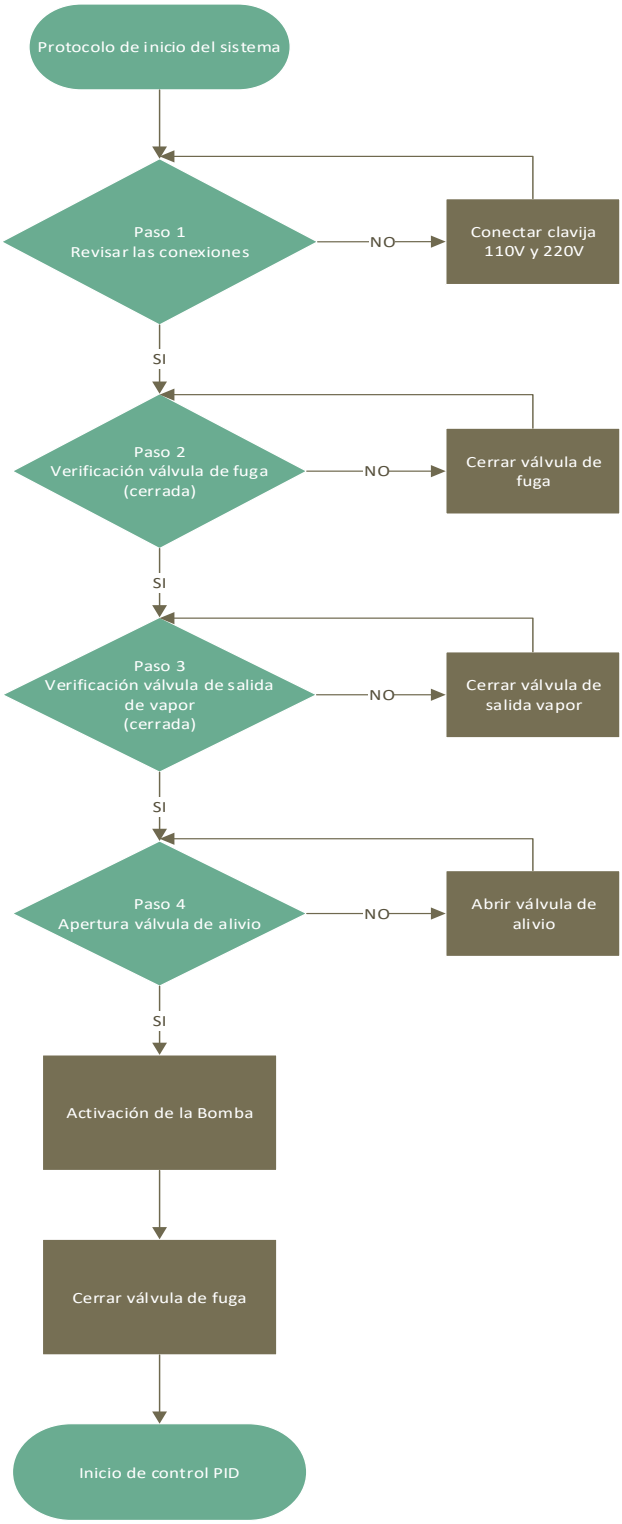
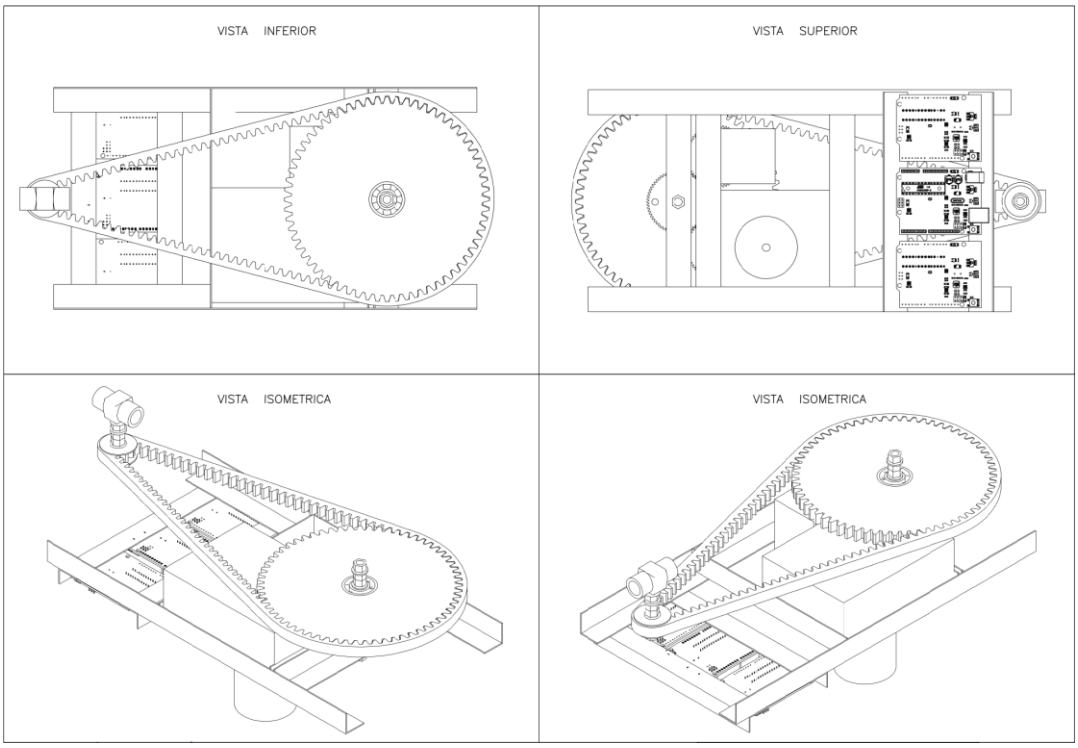
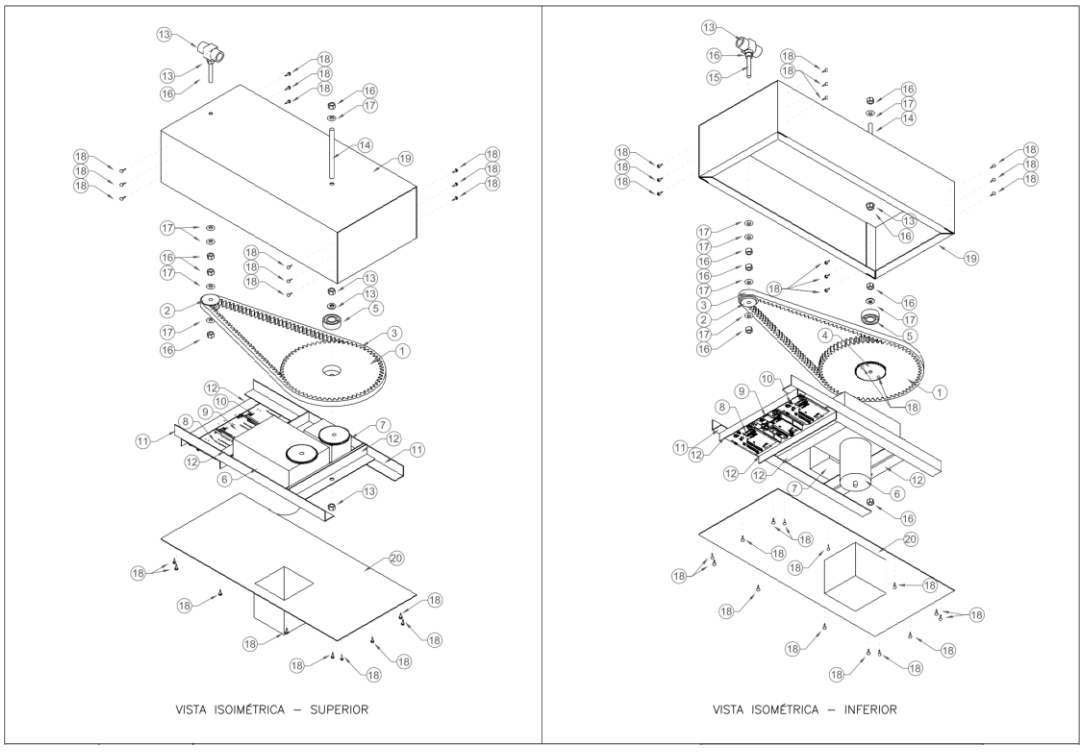


DIAGRAMA DE FLUJO INICIO DEL SISTEMA HMI



VISTAS DEL DISEÑO DE LA VALVULA





5 Bibliografía

[1] Acosta Beltrán Edison y Guerrero Varón Gustavo, (2014), diseño e implementación de un control de temperatura para la plataforma didáctica de procesos térmicos del grupo de investigación integra, Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[2] Guiza Saavedra Claudino y Bernal Velásquez Ramón, (2014), Desarrollo e implementación de un control y supervisión para la planta térmica AMATROL configurado desde el PLC S7-300 del laboratorio de electrónica, Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[3] Creus, Antonio, (2011), Instrumentación industrial, Octava Edición, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

[4] Yunus A. Cengel y Afshin J. Ghajar, (2011), Transferencia de calor y masa, Cuarta Edición, The McGraw-Hill, Mexico.

[5] (4-10-2016), online,

http://www.cicloaguavapor.com/condensador

[6] (4-10-2016), online,

http://es.made-in-china.com/co_huihuangcatalytic/product_Ceramic-Heat Exchanger-for-Regenerative-Burner_enuhnhsig.html

[7] (4-10-2016) online,

http://www.directindustry.es/cat/intercambiadores-calor-frio-industrial/intercambiadores-calor-condensadores-evaporadores-CC-568-_3.html

[8] (4-10-2016), online,

http://www.ideraenergia.es/producto/intercambiador-de-calor-modelo-85-tpt/

[9] (20-11-2016), online,

GRUPO MASER. Autómatas programables, Curso Básico de Autómatas http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/PROGRAMACION/GUIA%20GEMMA/guia_gemma.htm