

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN, PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO MEDIANTE PLC PARA SISTEMAS INDUSTRIALES.

MODELACIÓN, PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO MEDIANTE PLC DE UN CALDERO PIROTUBULAR DE VAPOR SATURADO CON UNA POTENCIA DE 150 BHP.

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.

ERICK MARCELO SUANGO ROJAS

erick.suango@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA.

ivaan.zambrano@epn.edu.ec

DMQ, JULIO 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ERICK MARCELO SUANGO ROJAS declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ERICK MARCELO SUANGO ROJAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ERICK MARCELO SUANGO ROJAS, bajo mi supervisión.

ING. OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERICK MARCELO SUANGO ROJAS

ING. OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a mi familia que gracias a su apoyo y sus palabras a lo largo de estos años permiten que mi vida estudiantil se desenvuelva con éxito.

Expreso mi más profunda gratitud a mi tutor, que mediante su experiencia y conocimientos me permitió alcanzar la culminación del presente trabajo.

Agradecer a la prestigiosa Escuela Politécnica Nacional, la cual fue un pilar fundamental para perfeccionar los conocimientos técnicos y aplicarlos al ámbito profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
1. Aplicación del PLC en Calderas Industriales	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Dinámica de sistemas mecánicos.....	3
1.4.1.1 Enfoque holístico y sinérgico	3
1.4.1.2 Enfoque holístico en el control automático.....	3
1.4.1.3 Modelación matemática de sistemas dinámicos	3
1.4.1.4 Modelación en espacio de estado	4
1.4.2 Simulación computacional	6
1.4.2.1 Función de transferencia	6
1.4.2.2 Señales de entrada	6
1.4.2.3 Simulación en lazo abierto.....	8
1.4.2.4 Simulación en lazo cerrado o retroalimentado	8
1.4.3 Control Digital Electromecánico.....	9
1.4.3.1 Interruptores y fines de carrera.....	9
1.4.3.2 Circuito de baja potencia	10
1.4.3.3 Preactuadores	10
1.4.3.4 Circuitos de mando y fuerza	11
1.4.4 Control automático	11
1.4.4.1 Señales analógicas y digitales.....	12
1.4.4.2 Sensores	12
1.4.4.3 Actuadores y preactuadores	13
1.4.4.4 Controlador lógico programable (PLC)	14
1.4.5 Control automático de sistemas de calentamiento.....	14

1.4.5.1	Sistema y ciclos y procesos termodinámicos.....	14
1.4.5.2	Primera ley de la termodinámica	15
1.4.5.3	Transferencia de calor	16
1.4.6	Calderas piro tubulares.....	17
1.4.6.1	Calderas	17
1.4.6.2	Caldera industrial pirotubular	18
1.4.6.3	Control y seguridad de la caldera	18
2.	METODOLOGÍA.....	20
2.1	Aspectos Técnicos	20
2.1.1	Propiedades de la caldera pirotubular	20
2.1.2	Condiciones ambientales.....	21
2.2	Sistemas termodinámicos en la caldera	21
2.2.1	Balance de energía	22
2.2.2	Modelos matemáticos.....	22
2.2.3	Ecuaciones en espacio de estado	23
2.3	Control del sistemas de automatización	24
2.3.1	Control de nivel de agua.....	24
2.3.2	Control de calentamiento de agua	26
2.3.3	Control del termostato	27
2.4	Programación del PLC	29
2.4.1	Código de programación	29
2.4.2	Elementos de simulación.....	34
3.	RESULTADOS	36
3.1	Resultados	36
3.1.1	Graficas del control en MATLAB.....	36
3.1.2	Masa de combustible para la caldera	39
3.1.3	Simulación en PC SIMU	40
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
4.1	Conclusiones	44
4.2	Recomendaciones	45
4.3	Trabajos Futuros	45
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
	ANEXOS.....	49
	ANEXO I. Propiedades de caldera pirotubular CBEX-2W	50
	ANEXO II. Control de calentamiento en MATLAB del caldero.....	52
	ANEXO III. Programación en STEP7 MicroWin	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de una planta.....	4
Figura 1.2 Planta con n variables de salida y m variables de entrada.....	5
Figura 1.3 Diagrama de Bode de primer orden.....	7
Figura 1.4 Control P, PI y PID.....	9
Figura 1.5 Interruptor, pulsador y micro interruptor.....	10
Figura 1.6 Circuito de mando y fuerza que acciona el motor.....	11
Figura 1.7 Parámetros de entrada, salida y perturbaciones.....	12
Figura 1.8 Sensores, controladores y actuadores.....	12
Figura 1.9 Ciclos termodinámicos más importantes.....	15
Figura 1.10 Partes de una caldera pirotubular.....	18
Figura 1.11 Esquema de una caldera pirotubular.....	19
Figura 2.1 Dimensiones de caldera pirotubular modelo CBEX-2W.....	21
Figura 2.2 Vista frontal de caldera modelo CBEX-2W.....	24
Figura 2.3 Superficie mínima de contacto de agua en mm ³	25
Figura 2.4 Función step para calentamiento de agua en lazo abierto.....	27
Figura 2.5 Función step para control de temperatura en el termostato en lazo abierto.....	28
Figura 2.6 Control PID para modulación de llama.....	29
Figura 2.7 Interfaz del software S7200.....	30
Figura 2.8 Comparadores lógicos para el tanque dentro del PLC.....	33
Figura 2.9 Comparadores lógicos para el tanque dentro del PLC.....	34
Figura 2.10 Representación del tanque de agua y termostato en PCSIMU.....	34
Figura 2.11 Barras numéricas de volumen, presión y temperatura.....	35
Figura 3.1 Diferencia de temperatura para el calentamiento de agua.....	36
Figura 3.2 Temperatura máxima de operación del termostato.....	37
Figura 3.3 Control retroalimentado para el control de la llama.....	38
Figura 3.4 Módulos utilizados para el software S7200.....	40
Figura 3.5 Interfaz de usuario de PCSIMU.....	40
Figura 3.6 Almacenamiento de agua en el software PCSIMU.....	41
Figura 3.7 Activación del termostato en el software PCSIMU.....	41
Figura 3.8 Valor máximo de temperatura y presión en el software PCSIMU.....	42
Figura 3.9 Activación de la válvula de gas y desactivación del termostato y manómetro.....	43
Figura 3.10 Nivel mínimo del tanque de agua en PCSIMU.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Flujo de agua y peso de la caldera Piro tubular.	20
Tabla 2.2 Dimensiones de la caldera Piro tubular.	21
Tabla 2.3 Condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil.	21
Tabla 2.4 Volumen de agua al interior de la caldera.	24
Tabla 2.5 Volumen y masa mínimo de agua.	25
Tabla 2.6 Calor específico y temperatura en los puntos inicial y final.	26
Tabla 2.7 Entalpías dentro del proceso de calentamiento.	28
Tabla 2.7 Bloques utilizados en el software STEP7 MicroWin.	31
Tabla 2.8 Valores asignados en el bloque MUL_R.	33
Tabla 3.1 Temperaturas de entrega de vapor indicadas en el termostato.	38
Tabla 3.2 Propiedades y masa de los combustibles para el calentamiento de agua.	39
Tabla 3.3 Cantidad de decimales del termostato y manómetro.	42

RESUMEN

El presente caso de estudio aborda el control automático en una caldera pirotubular. En primera instancia se aborda una síntesis documental acerca de los temas relevantes para el desarrollo de trabajo, dentro de las cuales se encuentra los elementos de simulación computacional, el control automático de sistemas térmicos y el funcionamiento de las calderas pirotubulares y los elementos relevantes para controlar el proceso de la planta, luego de la revisión bibliográfica se realiza el planteamiento del modelo matemático, el cual se realiza a partir de sistemas termodinámicos de acuerdo al tipo de sistema que corresponda, con los modelos se utiliza el control en lazo abierto y retroalimentado para determinar las curvas de temperatura respecto al tiempo que serán útiles para la simulación de la planta.

Consiguiente se analiza las variables que intervienen directamente en el control de la caldera tales como la temperatura y presión, las curvas obtenidas en el lazo abierto y cerrado nos sirven para determinar las temperaturas máximas y mínimas del proceso y el tiempo que tarda en ejecutar cada acción y de esta manera simular la planta de forma real.

La programación del controlador lógico programable (PLC) integra todos los parámetros de control previamente establecidos, dicha programación se realiza en el software libre STEP7 MicroWin el cual nos permite programar un PLC en el lenguaje de programación *Ladder* y simularlo en el programa complementario PCSIMU. Finalmente se ejecuta la simulación en donde se puede contemplar los resultados de la caldera pirotubular.

PALABRAS CLAVE: Programación, Simulación, PLC, MATLAB, caldera, control automático.

ABSTRACT

This case study addresses the automatic control in a firetube boiler, in the first instance a documentary synthesis is addressed about the relevant topics for the development of present project, within which are the elements of computer simulation, automatic control of thermal systems and the operation of firetube boilers and the relevant elements to control the process of the plant, After the bibliographic review, the mathematical model is developed, which is made from thermodynamic systems according to the type of system that corresponds, with the models the open loop and feedback control is used to determine the temperature curves with respect to the time that will be useful for the simulation of the plant.

Consequently, the variables directly involved in the control of the boiler such as temperature and pressure are analyzed, the curves obtained in the open and closed loop are used to determine the maximum and minimum temperatures of the process and the time it takes to perform each action and thus simulate the plant in a real way.

The programming of the programmable logic controller (PLC) integrates all the control parameters previously established; this programming is done in the free software STEP7 MicroWin which allows us to program a PLC in the Ladder programming language and simulate it in the complementary program PCSIMU. Finally, the simulation is executed where the results of the firetube boiler can be seen.

KEYWORDS: Programming, Simulation, PLC, MATLAB, boiler, automatic control.

1. Aplicación del PLC en Calderas Industriales

Las calderas industriales utilizan los mecanismos de transferencia de calor para transformar agua en estado líquido a gaseoso. El calentamiento del vapor de agua a presión constante permite que esta no posea humedad, por tanto, el resultante es el vapor saturado. El vapor saturado encuentra varias aplicaciones en la industria, entre las principales se encuentra el sector alimenticio que aprovecha el vapor para esterilizar cubiertos y recipientes, el sector hospitalario lo ocupa para desinfectar insumos médicos y la industria textil usa el vapor para controlar la temperatura de las telas durante el proceso de confección y para el calentamiento de agua para su posterior lavado.

Un controlador lógico programable (PLC) es una computadora industrial que controla los procesos de producción de forma autónoma, la aplicación de PLC va desde el control de procesos de fabricación en masa hasta la mejora de eficiencia energética de una planta y la reducción de tiempos muertos. La ejecución de tareas en el PLC es programada por un técnico con el objetivo de cumplir las necesidades de producción en una empresa.

Las calderas pirotubulares a nivel regional no contemplan el uso del PLC, debido a que su implementación de control automático contempla un costo elevado en relación a las aplicaciones tecnológicas que se buscan en la región, sin embargo, en aplicaciones industriales que implican procesos tecnológicos más relevantes el control automático toma relevancia debido a que se garantiza que la funciones operativas de la caldera tales como el control del encendido y apagado del quemador cuando alcancen temperaturas máximas o mínimas de vapor saturado, y el control del agua del tanque de almacenamiento para dar seguimiento de los niveles óptimos de agua para que esta pueda alcanzar la saturación. Las funciones mencionadas se realizan automáticamente debido a la programación previamente establecida por el PLC.

El control automático de una caldera empieza con la determinación de los parámetros operativos tanto del nivel de agua, la temperatura, la presión y la eficiencia térmica de la caldera, seguido se realiza la programación del PLC en un lenguaje acorde a las necesidades que se buscan en la industria de aplicación, luego sigue la implementación de los elementos en un programa de simulación para representar el proceso que se busca controlar, finalmente se realiza la simulación del programa para visualizar gráficamente el comportamiento del modelo en el respectivo lenguaje de programación.

1.1 Objetivo general

Desarrollar el control automático de un caldero pirotubular de vapor saturado con una potencia de 150 BHP mediante la modelación, programación, simulación y verificación del sistema para su posterior integración en un PLC, con el fin de optimizar el rendimiento del proceso.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica referente al rendimiento de calderas pirotubulares, incluyendo la identificación de parámetros operativos de control, para evaluar el rendimiento del proceso.
2. Modelar el sistema a partir del fenómeno físico, estableciendo los parámetros de la dinámica del sistema que requieren control automático.
3. Programar una secuencia de comandos en MATLAB que establezcan los parámetros de control automático de la caldera para su posterior implementación en un PLC.
4. Efectuar la simulación del proceso estableciendo las variables de control relevantes en el proceso industrial.
5. Optimizar el proceso industrial con el fin de mejorar el sistema y reducir costos de operación.

1.3 Alcance

El control automático en sistemas industriales comprende la automatización de procesos para que funcionen de forma autónoma, el presente trabajo busca integrar el control automático en una caldera pirotubular la cual genera vapor sobrecalentado por medio de la transferencia de calor entre combustible quemado y el agua almacenada. El proceso consiste en implementar un controlador en lazo abierto y retroalimentado, para controlar la temperatura, presión y la modulación de llama dentro de la caldera, posteriormente los datos obtenidos sirven como referencia para generar el código en el PLC, con el objetivo de ejecutar la simulación de la planta industrial con los parámetros establecidos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Dinámica de sistemas mecánicos

1.4.1.1 Enfoque holístico y sinérgico

Holismo es el análisis de un sistema en su totalidad, esto debe considerar la interacción de todas sus partes, más no el estudio de sus partes individuales. La sinergia según la Real academia de la lengua (RAE) se define como la *“Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales”*, esto se ve reflejado en la complejidad de la tecnología moderna, la cual implica el trabajo multidisciplinario, debido a que el estudio de varios de los sistemas actuales no se pueden controlar de manera individual, esto implica que los equipos de trabajo colaboren conjuntamente de manera sinérgica para alcanzar la tarea de forma cooperativa. (RAE, 2024)

1.4.1.2 Enfoque holístico en el control automático

Las ingenierías con enfoque industrial se especializan en sistemas dinámicos correspondientes a sus respectivas áreas de estudio, estos sistemas se analizan de forma holística correspondiente al área de especialización.

El control automático actúa sobre variables que permiten el movimiento de un sistema dinámico, el desarrollo de la automatización ha permitido el avance tecnológico de controladores lógicos programables (PLC's), controladores con inteligencia artificial entre los más conocidos. Los sistemas dinámicos actuales son automatizados, esto implica que hay que colaborar de manera holística y sinérgica con diferentes ingenierías que permitan desarrollar sistemas automáticos en diferentes ramas, estos sistemas pueden resolver necesidades sociales o industriales en beneficio de la humanidad.

Los sistemas que se buscan controlar automáticamente en la ingeniería mecánica son sistemas mecánicos, hidromecánicos, neumáticos, sistemas térmicos y termodinámicos de calentamiento y enfriamiento, por lo tanto, el control automático en la ingeniería mecánica se lo realiza con analogías de sistemas eléctricos, esta analogía puede llevar a errores, principalmente por la inercia de un sistema que es una característica de sistemas mecánicos. (Aguinaga, 2008)

1.4.1.3 Modelación matemática de sistemas dinámicos

Un sistema técnico o industrial es aquel que está compuesto de subsistemas, componentes y elementos que están relacionados para producir total o parcialmente una actividad de carácter industrial, en adelante a esta definición se la llamará “planta”, entonces una planta es un sistema dinámico que cambia con el pasar del tiempo, este cambio se produce por el movimiento de sólidos, fluidos o calor. La interacción de estos elementos define el

comportamiento de la planta y su estudio permite analizar el comportamiento dinámico de la misma.

En la figura 1.1 se observa una planta con varios sistemas donde las entradas representan las variables que causan el movimiento y las salidas representan el movimiento de los parámetros.

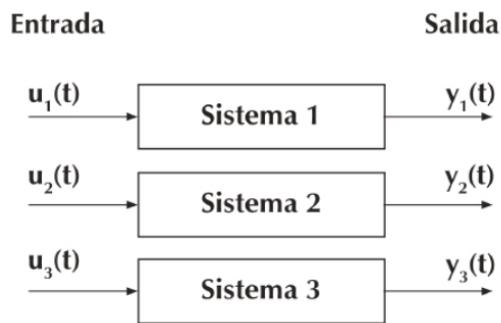


Figura 1.1 Diagrama de una planta.

Fuente: (Delgado et al., 2013)

El comportamiento dinámico de una planta se puede representar por medio de modelación matemática, relacionando los parámetros de entrada (variables independientes) con los parámetros de salida (variables dependientes), el estudio dinámico es posible con la ayuda de ecuaciones diferenciales, las cuales varían conforme al grado de complejidad de la planta, llegando a tener ecuaciones lineales o no lineales con múltiples parámetros de entrada y de salida.

El método analítico permite resolver ecuaciones diferenciales (previamente simplificadas) utilizando las transformadas de Laplace, transformando la ecuación diferencial a una ecuación algebraica, para posteriormente simplificarla a una expresión más simple en donde se podrá aplicar la transformada inversa de Laplace, el resultado es una ecuación en el dominio del tiempo que permite determinar la variable de entrada que modifica la variable de salida. Este método es válido para plantas con una sola entrada y salida hasta plantas con múltiples entradas y salidas, pero su dificultad radica en la resolución de cada una de las ecuaciones diferenciales. (Aguinaga, 2008)

1.4.1.4 Modelación en espacio de estado

Los modelos de espacio de estado permiten el análisis de sistemas dinámicos, este representa un sistema físico por medio de variables de entrada y las variables de estado (parámetros dependientes) representadas por ecuaciones diferenciales. Por la dificultad que representa el método analítico en el análisis de la planta, el análisis computacional tomará relevancia en la resolución de estos sistemas, en la simulación computacional es

importante que el modelo matemático se encuentre en formato matricial debido al formato del programa.

Como se indicó previamente, las ecuaciones diferenciales de cualquier orden obtenidas a partir del comportamiento dinámico de la planta deben ser simplificadas a una ecuación diferencial ordinaria lineal de primer orden, con el fin de despejar la derivada de las variables de estado. En la figura 1.2 se observa las variables de entrada y salida de una planta.



Figura 1.2 Planta con n variables de salida y m variables de entrada.

Fuente: (Aguinaga, 2008)

Con la figura 1.2 podemos obtener una representación matemática del comportamiento dinámico de una planta dada por las siguientes ecuaciones matriciales.

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (1)$$

$$Y = C \cdot X + D \cdot U \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) representadas en formato matricial para n y m cantidad de elementos se ilustran en las ecuaciones (3) y (4).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) representan el modelo matemático del comportamiento dinámico de una planta en formato matricial, donde las variables representan \dot{X} : Vector de derivadas de las salidas; X : Vector de estado; A : Matriz de coeficientes $n \times n$; U : Vector de entradas; B : Matriz de coeficientes $n \times m$; Y : Vector espejo; C : Matriz de escala (matriz identidad); D : Matriz estereo (matriz nula).

1.4.2 Simulación computacional

Antaño, la resolución de modelos matemáticos se los realizaba mediante métodos analíticos, este método por lo general era muy largo e implicaba cometer errores lógicos, los cuales no ayudaban a encontrar la solución del modelo, por otra parte, la simulación computacional es una herramienta para estudiar sistemas complejos, su implementación en la ingeniería permite la resolución de sistemas complejos con diferentes métodos numéricos y sistemas informáticos que estén a la disposición.

1.4.2.1 Función de transferencia

El comportamiento dinámico de una planta considera variables de entrada en función del tiempo, las cuales mediante la resolución de modelos matemáticos y el uso de la simulación computacional permitirá encontrar las variables de salida (de igual manera en función del tiempo). Sin embargo, la relación entre las variables dependientes e independientes deben ser tal que cada parámetro de entrada debe relacionarse con un parámetro de salida.

La función de transferencia es un modelo que relaciona la salida de la planta con la variable independiente mediante una relación polinómica, en donde el numerador representa el polinomio de salida de la planta y el denominador representa el polinomio de entrada.

Para plantas que contienen múltiples entradas y salidas, las funciones de transferencia serán igual a la multiplicación de las variables independientes y dependientes. Por otra parte, si el modelo de la planta viene representado en espacio de estado se puede utilizar herramientas computacionales que permiten encontrar todas las funciones de transferencia de la planta, para posteriormente realizar el control de la planta.(Aguinaga, 2008)

1.4.2.2 Señales de entrada

Una señal de entrada define el valor de salida requerido, estas señales son funciones temporales que se establecen en el parámetro independiente y permite evaluar el comportamiento dinámico de la planta, la resolución de función de transferencia por medio de herramientas computacionales nos permite encontrar funciones temporales relacionadas a la variable de salida.

Señal tipo impulso unitario

Es una señal que actúa instantáneamente sobre una variable de entrada para posteriormente desactivarse de inmediato, este tipo de señal simula situaciones críticas en el campo de ingeniería, esto debido a que las perturbaciones instantáneas pueden generar problemas en plantas mecánicas.

Señal tipo escalón unitario

Esta señal actúa sobre la variable de entrada y se mantiene pulsada a través del tiempo, de igual forma que la señal de impulso unitario, esta señal simula situaciones críticas debido a las perturbaciones se mantienen en la planta generando problemas.

Señal tipo rampa

Es una señal que actúa gradualmente sobre una planta, su modo de actuar es lento al inicio de la rampa y rápido al final. Esta señal se debe utilizar para controlar una planta, sin embargo, es necesario simular las otras señales para establecer la velocidad de respuesta máxima y así determinar el valor máximo de la señal tipo rampa.

Señal tipo frecuencial o vibratoria

La señal frecuencial tiene amplitud constante en una misma frecuencia repitiéndose periódicamente. Analizado una señal frecuencial de una planta mecánica se puede evaluar el comportamiento dinámico de una planta ante señales cercanas del mismo tipo, como vibraciones adyacentes al sistema o variaciones de temperatura. El estudio de estas señales permite la detección, prevención y predicción de fallas en la planta.

La interpretación del análisis frecuencial se lo realiza en el diagrama de Bode que representa gráficamente la frecuencia de un sistema, este diagrama contiene dos gráficos el de magnitud en dB vs frecuencia angular y el de fase vs frecuencia angular como se observa en la figura 1.3. En este diagrama también se identifica la frecuencia de cruce que es el intervalo en el cual la magnitud de salida es igual a la de entrada o 0 dB respectivamente.

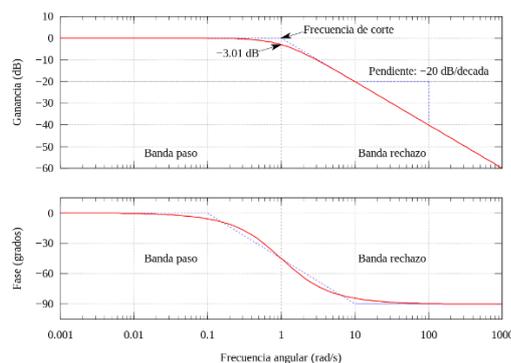


Figura 1.3 Diagrama de Bode de primer orden.

Fuente: (Wikipedia, 2006)

El funcionamiento de una planta implica vibraciones, las cuales son relacionadas con perturbaciones vibratorias del sistema; cuando la frecuencia de las vibraciones son mayores a la frecuencia de cruce, estas pueden disminuir debido al propio funcionamiento

de la planta, en cambio si la frecuencia de vibraciones es menor a la frecuencia de cruce, las vibraciones se amplifican causando daño al mecanismo.(Aguinaga, 2008)

1.4.2.3 Simulación en lazo abierto

El lazo abierto es un sistema que actúa en la señal de entrada, sin considerar lo que ocurra en la señal de salida. La simulación en lazo abierto puede considerar el comportamiento de cualquier planta, mientras que el control de este lazo es tal que la señal de salida no se compara con la señal de entrada, es decir, lo que ocurra en la señal de salida no modifica el accionar de la planta. Este tipo de controlador no es recomendable usar cuando la planta tenga perturbaciones que afecten su funcionamiento.

1.4.2.4 Simulación en lazo cerrado o retroalimentado

El lazo cerrado es un sistema donde la señal de salida realimenta a la señal de entrada con el fin de controlar la planta, de esta manera se corrigen perturbaciones de manera automática. La simulación en lazo cerrado define una función de transferencia para reducir el error entre la consigna y el valor retroalimentado de forma inmediata, sin afectar a la operación normal de la planta en estado estable. A continuación, se presentan varios tipos de control que ayudan a la simulación en lazo cerrado.

Control Proporcional

El control proporcional usa información de la señal de salida y posteriormente aplica una corrección para reducir el error hasta alcanzar una cercanía al resultado deseado, dicho resultado no siempre alcanza las condiciones impuestas. Este tipo de control se utiliza en sistemas simples, pero a medida que el sistema se vuelve más complejo el tiempo de respuesta será más amplio.

Control Integral

El control integral utiliza información de datos pasados e igual que el control proporcional reduce el error hasta condiciones exactas de configuración, es decir elimina las desviaciones previas de controles anteriores. Este control es más lento en relación con el control proporcional, por lo que no es recomendable su uso si el sistema no necesita compensación para llegar a la respuesta.

Control Derivativo

El control derivativo utiliza la información aportada de los controles previos, luego analiza el cambio de error hasta llegar a la respuesta y estima una proyección que reduzca el cambio de error de manera estable. El control derivativo es importante para controlar a menor medida las oscilaciones del sistema; este control no sirve para encontrar una

respuesta, por lo que tiene que estar acoplado a un controlador proporcional, integral o ambos.

Control Proporcional Integral Derivativo

El control proporcional integral derivativo es la combinación de los controladores de lazo cerrado mencionados previamente, siendo el control proporcional el que mejora el tiempo de respuesta, el control integral mejora la precisión para llegar a la señal de referencia y el control derivativo disminuye los picos que desestabilizan al controlador. El controlador PID tiene un tiempo de respuesta más rápido con relación a los controladores individuales, por lo que, cada control cumple su función de manera específica dentro del sistema.

El controlador PID es recomendable utilizarlo en simulación computacional, debido a que los controladores proporcional, integral y derivativo tienen ganancias propias, al cambiar el valor de alguna de estas ganancias, cambian las otras también, por lo que resolverla mediante resolución algebraica resulta muy complicado. En la figura 1.4 se observa la respuesta con controlador proporcional PI y PID.(Boghossian et al., 2022)

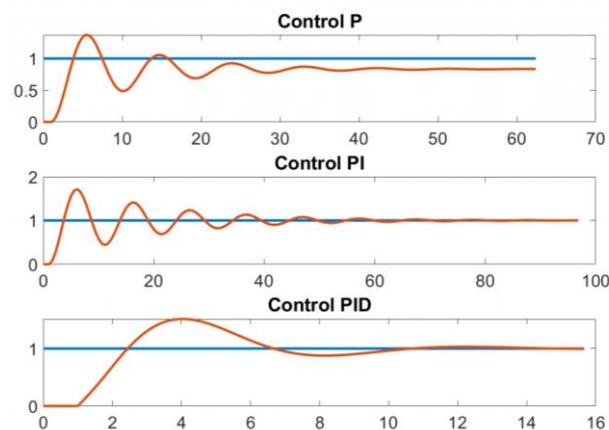


Figura 1.4 Control P, PI y PID.

Fuente: (Castaño, 2019)

1.4.3 Control Digital Electromecánico

1.4.3.1 Interruptores y fines de carrera

Un interruptor simple permite el paso o interrupción de corriente eléctrica, este dispositivo permite el paso de energía eléctrica cuando el interruptor se encuentra encendido.

El pulsador tiene la misma función que el interruptor simple con la diferencia que el pulsador se activa mientras se encuentre presionado el dispositivo y se desactiva cuando se suelta.

Un micro interruptor permite o interrumpe el flujo de energía eléctrica cuando se aplica una pequeña fuerza en el mecanismo. Según Yongxing Electrónica “Este dispositivo consta de tres partes el contacto común (C), un contacto normalmente abierto (NA) y un contacto normalmente cerrado (NC), el contacto NC está conectado al contacto C y el contacto NA está separado del contacto C. Cuando se presiona el micro interruptor, el mecanismo de resorte hace que los contactos cambien, el contacto NC se separa del contacto C y el contacto NA se conecta al contacto C.” (Yonexing, 2023). En la figura 1.5 se observa el funcionamiento de los tres dispositivos.

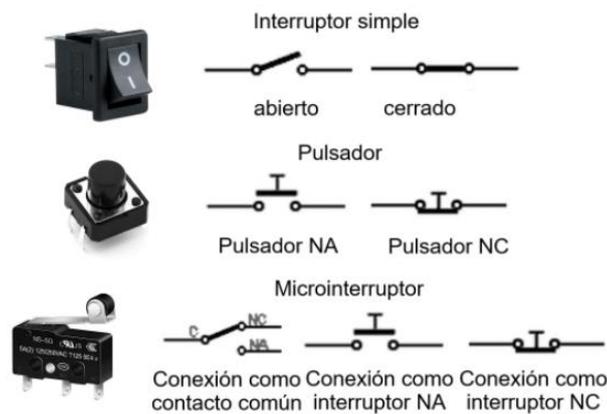


Figura 1.5 Interruptor, pulsador y micro interruptor.

Fuente: Propia

Los interruptores de fin de carrera sirven para detectar si un objeto está presente o no, por ello también son llamados interruptores de límite. Este dispositivo cuenta con sensores que detectan la posición del objeto móvil al pasar por sus inmediaciones, por ello es necesario que el objeto entre en contacto con los límites del sensor para que el fin de carrera funcione.

1.4.3.2 Circuito de baja potencia

Un circuito de potencia es un mecanismo que transporta energía eléctrica, que posteriormente se convierte en otro tipo de energía. Según carakenio73 “Estos circuitos están en todas las máquinas, aparatos, redes, procesos que requieran generación transmisión y distribución de energía eléctrica” (carakenio73, 2019)

1.4.3.3 Preactuadores

Un relé es un dispositivo eléctrico similar a un interruptor simple que se acciona eléctricamente. El relé generalmente tiene un contacto C, un contacto NC y un contacto NA; cuando circula corriente eléctrica por la bobina del relé, se crea un campo magnético que hace que los contactos cambien de posición y cuando deja de circular corriente

eléctrica entonces los contactos vuelven a su posición original, por ello los relevadores son conocidos como interruptores eléctricos. (Votione, 2020)

Un contactor realiza la misma función que un relé, con la diferencia este dispositivo funciona con corrientes eléctricas más elevadas, por ello los contactores son utilizado según Brendon Ridge para “efectuar maniobras de apertura y cierre en instalación de motores eléctricos”. (Ridge, 2020)

1.4.3.4 Circuitos de mando y fuerza

El circuito de fuerza lleva energía desde la fuente eléctrica hacia las máquinas o equipos que lo necesiten, estos circuitos conducen la corriente y voltaje necesarios para que funcionen los mecanismos de alta potencia.

El circuito de mando es el sistema que permite el control y funcionamiento de las máquinas industriales, estos circuitos manejan bajos voltajes en relación a los circuitos de fuerza, además estos sistemas controlan el encendido, apagado o enclavamiento mecánico de varios sistemas mecánicos tales como motores, válvulas bombas entre otros.(Canales, 2007)

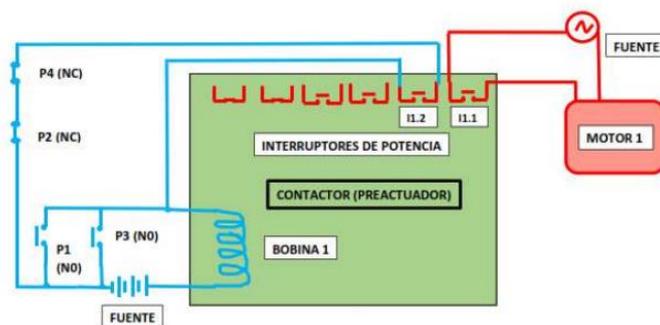


Figura 1.6 Circuito de mando y fuerza que acciona el motor.

Fuente: (Aguinaga, 2008)

1.4.4 Control automático

Control de plantas

El control de una planta se lo realiza definiendo parámetros operativos, estas son las variables de entrada, salida y perturbaciones. Las variables de entrada son la causa de movimiento, las variables de salida son la representación del movimiento y las perturbaciones son parámetros ambientales propios del ecosistema de trabajo de la planta, los cuales entran en consideración cuando afectan drásticamente el funcionamiento de un sistema. En la figura 1.7 se observa una representación de estos parámetros operativos.

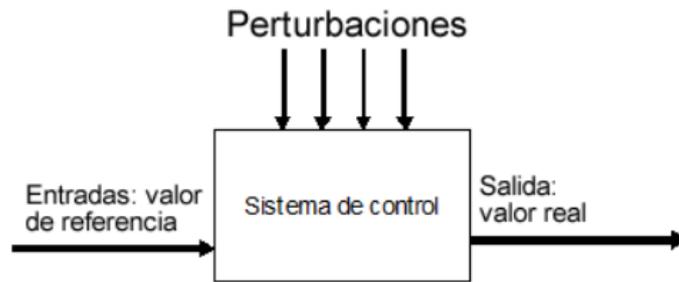


Figura 1.7 Parámetros de entrada, salida y perturbaciones.

Fuente: (Canales, 2007)

1.4.4.1 Señales analógicas y digitales

Las señales analógicas son continuas y representan variables físicas del medio, tales como la humedad, la presión, la temperatura entre otros. Las señales digitales son discretas, lo cual implica una representación binaria (0 y 1) en intervalos de tiempo previamente definidas, un ejemplo simple es un programa de una computadora.

Componentes del control

Para implementar el control automático en una planta es necesario conocer sobre los sensores, controladores y actuadores. Los sensores detectan o miden parámetros físicos, posteriormente el dispositivo transforma las magnitudes físicas en señales eléctricas para enviarla al controlador. El controlador recibe las señales eléctricas de los sensores y filtra, procesa y rectifica la información para ser enviada hacia los actuadores. Los actuadores reciben la información del controlador y ejecutan físicamente las acciones establecidas en las variables de entrada de la planta. En la figura 1.8 se observa un diagrama representando los sensores, controlador y actuadores.

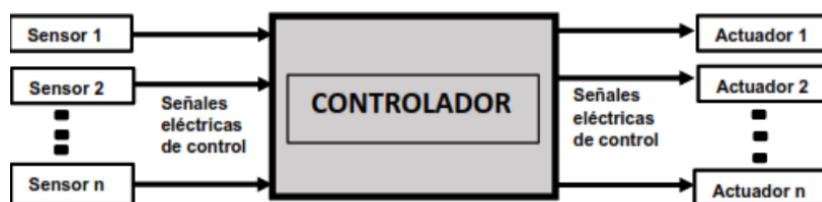


Figura 1.8 Sensores, controladores y actuadores.

Fuente: (Aguinaga, 2008)

1.4.4.2 Sensores

Sensores digitales

Los sensores operan principalmente con señales digitales discretas, que previamente son sintetizadas. El sensor usado principalmente en la industria es el sensor digital biestable el

cual funciona como un interruptor o un pulsador, por otra parte, para el control automático no es recomendable que un sensor biestable funcione como un interruptor debido a que no debe existir enclavamiento debido a las normas de seguridad industrial.

Los sensores que funcionan como pulsadores pueden ser remplazados por sensores inductivos o capacitivos los cuales detectan la proximidad de un objeto, para ello es necesario definir una frontera que detecte la variable física de control conocido como “umbral”, su funcionamiento es un contacto NA cuando el parámetro físico está dentro del umbral y un contacto NC cuando el parámetro físico es mayor que el umbral.(Vollione, 2020)

Sensores analógicos

Los transductores transforman señales analógicas como parámetros físicos del campo a señales discretas. La señal discreta que se obtiene con la ayuda de los transductores es un valor de voltaje (entre un rango entre 0 y 10 V), o un valor de corriente (entre un rango de 0 y 20 mA). La señal discreta obtenida se relaciona directamente con la señal analógica de entrada, lo conveniente es que la relación entre ambas sea lineal, de no ser el caso, el fabricante debe proporcionar una curva proporcional entre la señal analógica y digital.

1.4.4.3 Actuadores y preactuadores

Actuadores

El actuador es el dispositivo que transforma cualquier tipo de energía en energía mecánica, es decir el dispositivo que produce movimiento en la planta, por ello también se le llama motor, su clasificación consiste en motores eléctricos, hidráulicos y neumáticos.

Preactuadores

Los sensores y controladores funcionan como circuitos de mando, es decir trabajan con voltajes y amperajes muy bajos, mientras que los actuadores o motores eléctricos funcionan con potencias elevadas por ende el amperaje que circula por los circuitos alcanza las decenas de amperios. Por ello, es necesario un componente que relacione las señales de bajo amperaje con las de alto amperaje, el componente con estas características se llama preactuador.

Preactuadores digitales

El preactuador digital clásico funciona como un relé, donde la bobina se conecta al circuito de mando, sensores y controlador, para posteriormente hacer funcionar el motor eléctrico. Este modelo fue la base del control electromecánico, que con una sola bobina controlaba

interruptores de potencia para el arranque de motores; el arranque producía sobrecorriente que mediante la configuración de contactores redujo el problema mencionado en el arranque de los motores. Bajo este concepto, se insertaron elementos de control electromecánico como los temporizadores y contadores.

En la actualidad se usa elementos electrónicos como el transistor que por sus propiedades permiten modificar la señal eléctrica para la conexión entre los circuitos de mando y fuerza, esto permite la reducción y optimización para arranque de motores.

Preactuadores analógicos

Este preactuador convierte señales analógicas a señales discretas en rangos de corriente eléctrica para motores de corriente continua y en rangos de frecuencia para motores de corriente alterna, con el fin de reducir la velocidad de los motores eléctricos, por ello a los preactuadores analógicos se los conoce como variadores de velocidad; estos se usan principalmente para reducir la velocidad por medio del ajuste de frecuencia.

1.4.4.4 Controlador lógico programable (PLC)

La norma IEC 61131 establece que un PLC es un dispositivo programable que es utilizado en trabajo de campo, el cual utiliza una memoria programable, previamente preparada para cumplir instrucciones, las funciones específicas que cumple son la lógica, secuencia, temporización, recuento de procesos. Esto con el fin del controlar las variables de entrada y salida, las señales digitales y analógicas en distintos procesos.

En la industria actual el uso del PLC es fundamental para el control de procesos, el principio de funcionamiento es el mismo para cualquier tipo de máquina, así como su conexión, instalación y programación, por ello, su implementación será fundamental para el control del proceso térmico y mecánico que será analizado.

1.4.5 Control automático de sistemas de calentamiento

1.4.5.1 Sistema y ciclos y procesos termodinámicos

Sistema termodinámico

Un sistema termodinámico es una parte aislada del espacio con el fin de ejecutar un estudio, este aislamiento puede ser real o imaginario. Un sistema puede ser una máquina térmica; su clasificación consiste en sistemas aislados (no intercambia masa y energía con sus alrededores), sistemas abiertos (intercambia masa y energía con sus alrededores) y sistema cerrado (intercambia energía, pero no masa con sus alrededores). (Artedínámico, 2022)

Ciclos termodinámicos

Un ciclo termodinámico es cualquier proceso termodinámico que al transcurrir un ciclo completo vuelve a su estado inicial, la primera ley de la termodinámica menciona que la variación de energía interna debe ser nula por ende todo el calor transferido debe ser igual al trabajo efectuado por el sistema. Los ciclos termodinámicos de mayor estudio se muestran en la figura 1.9 los cuales son el de Carnot, Ericsson, Stirling y Rankine.

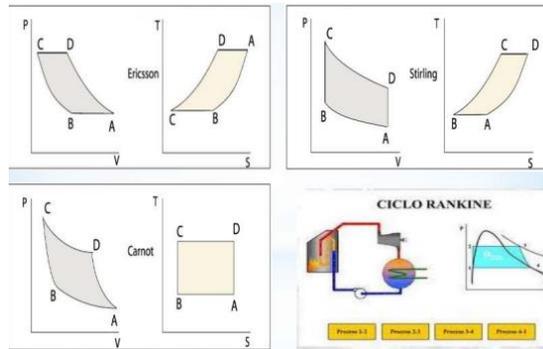


Figura 1.9 Ciclos termodinámicos más importantes.

Fuente: (Aguinaga, 2023)

Procesos termodinámicos

Un proceso termodinámico es la evolución en el tiempo de las magnitudes termodinámicas (presión, volumen y temperatura), es decir llevar un sistema termodinámico a otro. Los principales procesos termodinámicos son los isotérmicos (Temperatura constante), isobárico (Presión constante), isocórico (Volumen Constante) y adiabáticos (No hay intercambio de calor).

1.4.5.2 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica relaciona el trabajo, calor y la energía interna de un sistema. Esta relaciona el cambio de energía interna (ΔU) de un sistema termodinámico con el trabajo (ΔW) realizado en dicho sistema y la energía calorífica (ΔQ) transferida desde el sistema o hacia él. La primera ley puede escribirse conforme a la ecuación (5).

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (5)$$

La energía calórica es un tipo de energía que es liberada en forma de calor. En sistemas termodinámicos la energía calórica se relaciona con el intercambio de masa (m), el calor específico de la sustancia de trabajo (C_p) y la variación de temperatura entre el estado inicial y final (ΔT), dicha expresión se expresa en la ecuación (6).

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

Balance de energía

Un sistema cerrado es aquel que intercambia energía con sus alrededores, pero no intercambia masa, un ejemplo es el refrigerador que intercambia calor con el ambiente. El balance energético en forma general para un sistema cerrado se los expresa en la ecuación (7), la cual guarda similitud con la ecuación de la primera ley de la termodinámica.

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta U \quad (7)$$

En sistemas abiertos existe intercambio de energía y masa, un ejemplo industrial es un intercambiador de calor. Por otra parte, el balance energético de este sistema considera un flujo másico en el tiempo, por ello la ecuación (8) añade el cambio de energía interna (ΔU) como derivada del tiempo y adicionalmente se implementa la variación de densidad por la derivada del flujo volumétrico del fluido en función del tiempo ($\Delta(\rho\dot{V})$) tal como se muestra a continuación.

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta\dot{U} + \Delta(\rho\dot{V}) \quad (8)$$

1.4.5.3 Transferencia de calor

Conducción

Es la transferencia de calor a través del contacto de dos superficies con distinta temperatura. El calor transferido a través de una superficie (\dot{Q}) es equivalente a coeficiente de calor por conducción (K_{cond}) por el área de contacto (A) y por la diferencia térmica entre las superficies (ΔT), la ecuación (9) expresa los términos implicados.

$$\dot{Q} = K_{cond} \cdot A \cdot \Delta T \quad (9)$$

Convección

Es la transferencia de calor debido al movimiento de un fluido que entra en contacto con una superficie. El calor transferido por convección (\dot{Q}) es equivalente a coeficiente de calor por convección (h) por el área de contacto (A) y por la diferencia térmica entre la superficie y la temperatura ambiente ($T_s - T_\infty$), la ecuación (10) expresa los términos implicados.

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

Radiación

La transferencia de calor por radiación se da por medio de ondas electromagnéticas sin la necesidad de medios de propagación, por ello la transferencia puede ocurrir incluso en el vacío. La ley de Stefan-Boltzmann establece la relación entre energía radiante emitida por un cuerpo negro y su temperatura, la ecuación (10) expresa matemáticamente dicha ley.

$$\dot{Q} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (10)$$

Donde e es la emisividad del material, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$), A es el área radiante y T es la temperatura superficial.

Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor “U” según Bautista es “*la intensidad total de transferencia de calor a través de un material*” (Bautista, 2008), este coeficiente considera los coeficientes de conducción y convección en una superficie, por ello para conocer este coeficiente debemos conocer los materiales de construcción, su espesor, el coeficiente de conductividad de los materiales, la velocidad del aire en interior y en el exterior. En una pared de una casa el coeficiente “U” se expresa en la ecuación (11).

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{e}{K_{cond}} + \frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}} \quad (10)$$

Donde U expresado en (W/m^2), K_{cond} es el coeficiente de conducción de la pared, e es espesor de la pared, h_{in} es el coeficiente de convección de la pared interior y h_{out} es el coeficiente de convección de la pared exterior.

1.4.6 Calderas piro tubulares

1.4.6.1 Calderas

Las calderas ocupadas en la industria son intercambiadores de calor que producen vapor de agua a partir de la quema de combustible, actualmente son utilizadas en procesos industriales que trabajan con elevadas temperaturas tales como la industria química, petroquímica, textil, farmacéutica, generación de energía entre otros.

Estos equipos cuentan con varias partes para realizar su funcionamiento, las partes fundamentales son constituidas por:

- **Quemador.** - Es el encargado de la quema del combustible, este puede ser combustible líquido, gas natural o combustible sólido. Este elemento aporta calor a la caldera.
- **Hogar o Cámara de combustión.** – En este espacio se produce la quema de combustible y en donde se produce la temperatura más elevada en el proceso.
- **Circuito de humos.** – Red que dirige los humos hacia el exterior.
- **Retorno de agua.** – Según Euro Air es la “*toma que retorna el agua que viene desde los radiadores o el acumulador*”.(Euro air, 2020)

- **Circuito de agua.** – Ruta de circulación donde el agua se calienta por medio de la absorción de calor por la paredes.

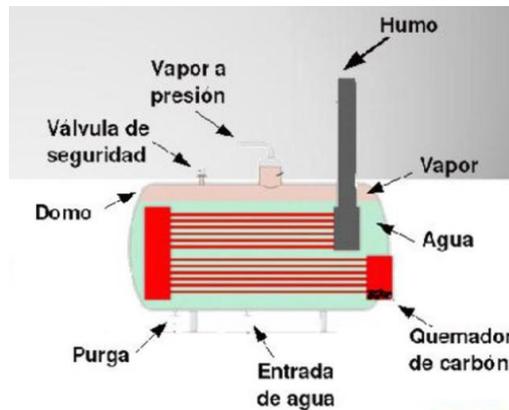


Figura 1.10 Partes de una caldera pirotubular.

Fuente: (Rodríguez, 2016)

1.4.6.2 Caldera industrial pirotubular

Esta caldera es un intercambiador de calor donde los gases de combustión circulan por el interior de las tuberías. En este proceso se quema combustible y los gases resultantes circulan por los tubos interiores y se evacua por la chimenea, por otra parte, el agua es almacenada en el tanque de la caldera y gracias a la transferencia de calor entre las tuberías que transportan los gases de combustión y el agua, se genera vapor saturado que es el producto final esperado.

1.4.6.3 Control y seguridad de la caldera

Válvulas

Una válvula principalmente regula el paso de un fluido, para el control de una caldera se considera la válvula tipo globo que regula el flujo de vapor y además permite el paso del fluido a través de las tuberías, una válvula de seguridad reduce la presión dentro de la caldera cuando se supera el límite manométrico establecido, la válvula de purga se activa manualmente para limpiar sedimentos en el interior de la caldera y la válvula de venteo que reduce el aire presente en tuberías de líquidos y vapor.

Instrumentos de medida

Es indispensable el control de temperatura y presión para establecer el estado de la caldera, por ello una caldera debe contar con un manómetro el cual mide la presión dentro de la caldera (en calderas se utilizan el manómetro de diafragma y el de tubo de Bourdon) (DGOS-DIEM, 2019) y un termómetro que mide la temperatura del agua y gases de combustión.

Control electromecánico

Es el control de las máquinas mediante dispositivos eléctricos, el cual controla principalmente la arranque, parada, sobrepresión y seguridad.

En calderas se debe realizar el control por el límite de alta presión que detiene el funcionamiento del quemador ante el exceso de presión en la caldera y el control de modulación de presión que receipta las mediciones de presión de vapor y en base a ello regula el flujo de llama del quemador para así satisfacer la demanda de vapor.

Se debe implementar un control del agua de alimentación que detiene el agua cuando se alcanza el límite máximo permisible y cuando el nivel de agua es muy bajo activa la válvula de alimentación de agua para alcanzar los limite establecidos. En la figura 1.11 se observa los principales elementos de control y seguridad de una caldera pirotubular.(DGOS-DIEM, 2019)

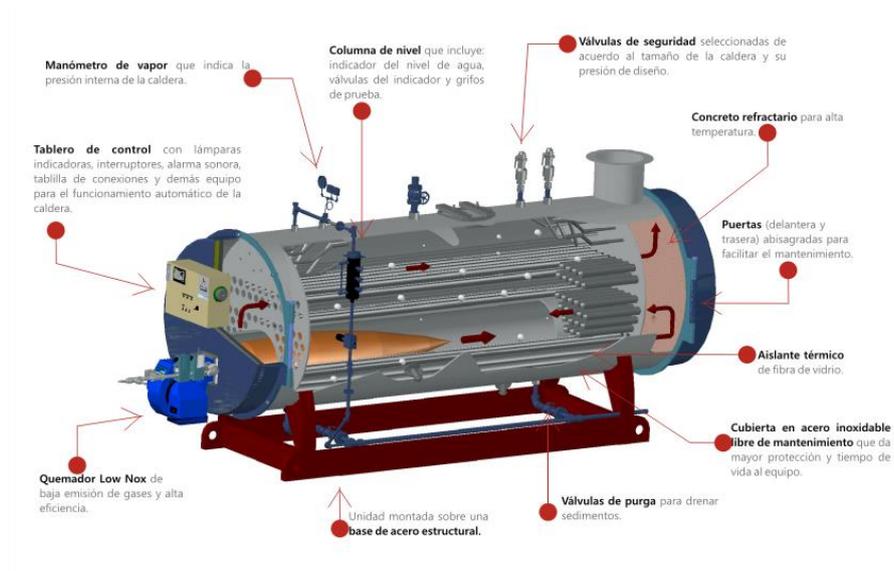


Figura 1.11 Esquema de una caldera pirotubular.

Fuente: (Euro air, 2020)

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del componente considera la implementación de tres secciones, la primera cuenta con la recolección de datos técnicos para el correcto funcionamiento de una caldera pirotubular en la industria, así como condiciones de operación y condiciones ambientales, posteriormente se desarrolla los modelos matemáticos que gobiernan el sistema para de esta manera realizar el control de los componentes de la planta. La segunda sección cuenta con el control de la planta, para ello se incluye los modelos matemáticos en software Matlab con la ayuda de la librería *Control System Toolbox*, la cual permite el control en lazo abierto de la temperatura del vapor de agua y del termostato de la caldera, por otro lado, el control de la llama del quemador se realiza con lazo retroalimentado, el cual garantiza una temperatura al interior de la caldera.

La última sección cuenta con la implementación de los resultados descritos en Matlab en los softwares libres STEP7 MicroWin y PCSIMU, donde se realiza el control digital y analógico de la temperatura, nivel de agua y presión interna de la caldera, utilizando herramientas internas del software tales como sensores, actuadores y temporizadores y pantallas digitales para indicar los niveles de operación de la caldera.

2.1 Aspectos Técnicos

2.1.1 Propiedades de la caldera pirotubular

El presente trabajo considera el control automático de una caldera pirotubular, por ello en primera instancia, se considera la selección de una caldera comercial. La caldera seleccionada está diseñada por la marca *Cleaver Brooks*, su modelo es CBEX-2W con capacidades de 100-800 BHP cuyas especificaciones principales se encuentran en el anexo 1. Para el control automático es necesario establecer el peso de agua que soporta la caldera y capacidad normal de entrega de vapor a 150 BHP. Las principales propiedades de la caldera se encuentran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Flujo de agua y masas de agua en la caldera Pirotubular.

Propiedades de la Caldera Pirotubular de 150 BHP	
Capacidad nominal (lb-vapor/hr a 100°C)	5175
Peso normal de agua (lb)	8010
Peso máximo permisible del tanque (lb)	9000

Las propiedades dimensionales de la caldera también influyen en las pérdidas caloríficas con el medio externo, por tanto, es necesario conocer el largo y el diámetro interno de la

caldera. Las propiedades mencionadas se encuentran en la tabla 2.2, acompañadas con la figura 2.1, la cual representa el modelo y dimensiones principales de la caldera.

Tabla 2.2 Dimensiones de la caldera Piro tubular.

Dimensiones de la Caldera Piro tubular de 150 BHP	
Largo del caldero (pulg) A	140
Diámetro del caldero (pulg) H	60

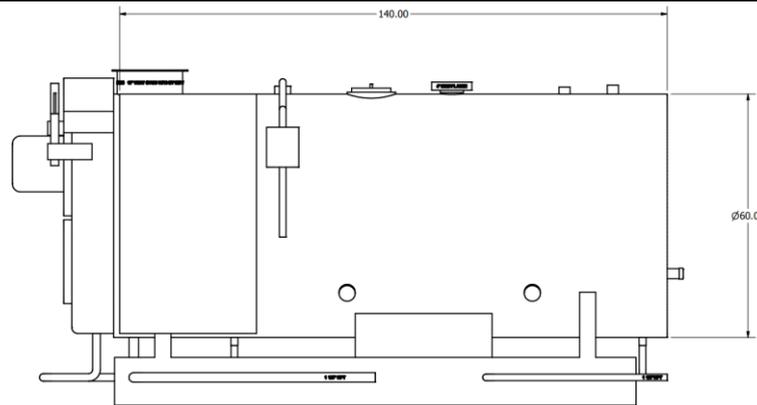


Figura 2.1 Dimensiones de caldera piro tubular modelo CBEX-2W.

Fuente: Propia.

2.1.2 Condiciones ambientales

El estudio de la caldera piro tubular considera la presión atmosférica y la temperatura ambiente de la ciudad de Guayaquil, los cuales son obtenidos a través del *ASHRAE Handbook fundamentals* (ASHRAE, 2009) y se espera después del calentamiento vapor sobresaturado a 200 (psig). En la tabla 2.3 se indica los parámetros ambientales utilizados y estimados para el presente caso de estudio.

Tabla 2.3 Condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil.

Condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil.	
Presión atmosférica (psig)	14,7
Temperatura promedio anual (°C)	26,1
Presión de vapor estimada (psig)	200

2.2 Sistemas termodinámicos en la caldera

Los sistemas termodinámicos como se indica previamente consisten en sistema abierto y cerrado. El sistema termodinámico cerrado en una caldera piro tubular consiste en el calentamiento de agua (previamente almacenada) por medio de la transferencia de calor

entre el combustible que circula por las tuberías interiores y el agua depositada en el tanque, hasta alcanzar el valor de temperatura establecido.

El sistema termodinámico abierto en la caldera pirotubular consiste en el control de temperatura del vapor en la salida de la caldera, esto se consigue por medio de un controlador en lazo abierto en el termostato dentro de un rango establecido, por otra parte, un controlador PID en el quemador sirve para que la temperatura del combustible se mantenga lo más estable posible, favoreciendo la saturación del agua. Conforme avance la metodología se presentan los modelos matemáticos necesarios para alcanzar lo establecido previamente.

2.2.1 Balance de energía

En base a lo establecido en la primera ley, dentro de los sistemas termodinámicos de la caldera se establece que la potencia calórica (Pot_Q) es la energía que ingresa al sistema en un periodo de tiempo (potencia establecida por el fabricante), las pérdidas caloríficas con el medio ambiente ($Perd_Q$) es la energía que sale de la planta y las pérdidas térmicas ($Perd_T$) es el producto de las pérdidas caloríficas con la diferencia de temperatura (ΔT). Las pérdidas caloríficas y térmicas son representadas matemáticamente en las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$Perd_Q = U \cdot A_{Superficial} \quad (11)$$

$$Perd_T = U \cdot A_{Superficial} \cdot \Delta T \quad (12)$$

En la ecuación (12) se observa el término “U” que es el coeficiente de transferencia de calor, y el área superficial ($A_{Superficial}$), la cual es el área de las paredes de la caldera mostrada en la figura 2.1, la ecuación (13) considera la superficie de transferencia de calor con el medio ambiente esto se logra con los datos mostrados en la tabla 2.2, en donde el largo del caldero se representa con “L” y el diámetro del caldero con “ ϕ ”. (Aguinaga, 2023)

$$A_c = 2 \left(\pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \right) + 2\pi \cdot \theta \cdot L \quad (13)$$

2.2.2 Modelos matemáticos

Modelo matemático de sistemas cerrados

El calentamiento de agua se considera como un sistema termodinámico cerrado, es decir no hay intercambio de masa; a continuación, se desarrolla la ecuación (11) para determinar la temperatura dentro del caldero pirotubular en cada instante de tiempo.

$$\begin{aligned}\frac{d(\Delta E)}{dt} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \\ m \cdot C_p \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} &= Pot_Q - Perd_Q \cdot \Delta T \\ \frac{d(\Delta T)}{dt} &= \frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Pot_Q - \left[\frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Perd_Q \right] \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{14}$$

Modelo matemático de sistemas abiertos

En los sistemas termodinámicos abiertos se considera el flujo másico de agua, con este modelo se busca controlar la temperatura del vapor de salida, esto se logra con el control de la modulación de llama y la temperatura del vapor en la salida de la caldera, permitiendo su operación dentro de un rango establecido, en la ecuación (15) se determina el control de temperatura en cada instante de tiempo.

$$\begin{aligned}\frac{d(\Delta E)}{dt} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \\ m \cdot C_p \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T &= Pot_Q - Perd_Q \cdot \Delta T \\ \frac{d(\Delta T)}{dt} &= \frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Pot_Q - \frac{\dot{m}}{m} \cdot \Delta T - \frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Perd_Q \cdot \Delta T \\ \frac{d(\Delta T)}{dt} &= \frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Pot_Q + \left[-\frac{\dot{m}}{m} - \frac{1}{m \cdot C_p} \cdot Perd_Q \right] \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{15}$$

2.2.3 Ecuaciones en espacio de estado

Las ecuaciones (14) y (15) representan el cambio de temperatura con respecto al tiempo para un sistema termodinámico abierto y cerrado, estas ecuaciones deben ser representadas matricialmente para establecer el comportamiento dinámico de la caldera, es decir encontrar las curvas de calentamiento respecto al tiempo para ambos sistemas, a continuación, se representa las ecuaciones en espacio de estado. (Aguinaga, 2023)

Sistema cerrado	Sistema abierto
$\Delta \dot{T} = \left[-\frac{Perd_Q}{m \cdot C_p} \right] \cdot \Delta T + \left[\frac{1}{m \cdot C_p} \right] \cdot Pot_Q$ $A = \left[-\frac{Perd_Q}{m \cdot C_p} \right]$ $B = \frac{1}{m \cdot C_p}$ $C = [1]$ $D = [0]$	$\Delta \dot{T} = \left[-\frac{\dot{m}}{m} - \frac{Perd_Q}{m \cdot C_p} \right] \cdot \Delta T + \left[\frac{1}{m \cdot C_p} \right] \cdot Pot_Q$ $A = \left[-\frac{\dot{m}}{m} - \frac{Perd_Q}{m \cdot C_p} \right]$ $B = \frac{1}{m \cdot C_p}$ $C = [1]$ $D = [0]$

2.3 Control del sistemas de automatización

2.3.1 Control de nivel de agua

En la tabla 2.1 se indica el peso normal de agua de acuerdo al fabricante, esta masa indica la capacidad normal de operación de la caldera, es decir, la cantidad de agua para un funcionamiento óptimo; por otra parte, la cantidad mínima de agua conforme al manual de instalación establece que es $\frac{1}{2}$ pulgada hacia arriba de la última fila de tubos, en la figura 2.2 se observa una vista frontal de la caldera para calcular el volumen de agua mínimo que necesita para su funcionamiento.

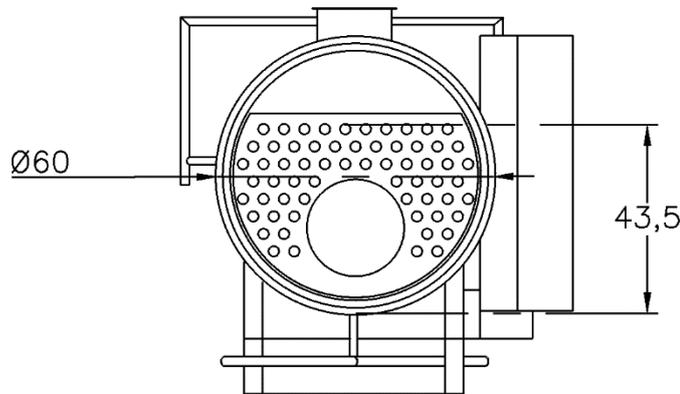


Figura 2.2 Vista frontal de caldera modelo CBEX-2W.

Fuente: Propia

El volumen total de la caldera es equivalente al de un cilindro; el volumen normal de agua se lo obtiene con el peso normal de la caldera y la densidad del agua; la diferencia entre el volumen de la caldera y el volumen normal de agua da como resultado el volumen que ocupa las tuberías dentro del caldera piro-tubular, lo valores mencionados se encuentran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Volumen de agua al interior de la caldera.

Volumen de agua al interior de la caldera	
Volumen de la caldera (m ³)	6,487
Volumen normal de agua (m ³)	3,652
Volumen de la tubería (m ³)	2,835

El volumen mínimo de agua (V_{AM}) se obtiene mediante la diferencia entre la superficie de la circunferencia y el área del segmento circular (A_{SC}), el resultado debe ser multiplicado por la longitud de la caldera (L), la ecuación (16) muestra esta relación. Con la ayuda del

software AutoCAD se obtiene el valor de la superficie mínima de agua tal como muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Superficie mínima de contacto de agua en mm³.

Fuente: Propia

$$V_{AM} = A_{SC} \cdot L \quad (16)$$

$$V_{AMST} = V_{AM} - V_T \quad (17)$$

$$m_{AM} = V_{AMST} \cdot \rho_A \quad (18)$$

La ecuación 17 indica el volumen mínimo de agua sin las tuberías (V_{AMST}) lo cual se logra mediante la diferencia entre el volumen mínimo de agua (V_{AM}) y el volumen de las tuberías (V_T). Por otra parte, la ecuación (18) muestra la masa de agua mínima (m_{AM}) que necesita la caldera para su funcionamiento, esto se realiza mediante el producto del volumen mínimo de agua sin la tubería (V_{AMST}) y la densidad del agua a temperatura ambiente (ρ_A), posteriormente se realiza la conversión de kilogramos a libras para establecer los niveles de agua mínimo y máximo. En la tabla 2.5 se observa los valores previamente descritos. (CleverBrooks, 2024)

Tabla 2.5 Volumen y masa mínimo de agua.

Volumen y masa mínimo de agua	
Volumen mínimo de agua con la tubería (m ³)	5,099
Volumen mínimo de agua sin la tubería (m ³)	2,264
Masa de agua mínima (lb)	4965,85

2.3.2 Control de calentamiento de agua

El calentamiento de agua inicia desde la temperatura y presión establecidas en la tabla 2.3, hasta la presión de vapor saturado que entrega la caldera CBEX-2W. Consiguientemente, se establece el calor específico en el punto inicial y el calor específico de saturación en el punto final y la temperatura del vapor al final del proceso; los valores de calor específico y temperatura mencionados se los puede encontrar en la campana termodinámica de temperatura vs volumen específico. El presente trabajo integra los valores mencionados dentro del software Matlab mediante la librería "XSteam" la cual permite encontrar de forma sencilla los valores de calor específico, presión, temperatura entre otros.

Con los valores de calor específico en los dos puntos se debe escoger el mayor entre estos, esto debido al requerimiento energético necesario para que el agua se caliente hasta el vapor saturado, posteriormente el valor del calor específico seleccionado se incluye en las ecuaciones de espacio de estado. En la tabla 2.6 se observa los valores obtenidos en Matlab para los dos puntos y el valor de temperatura máxima permisible del termostato.

Tabla 2.6 Calor específico y temperatura en los puntos inicial y final.

Calor específico y temperatura	
Calor específico a temperatura ambiente (J/kg-K)	4181,5
Calor específico de saturación (J/kg-K)	4463,6
Temperatura de vapor saturado (°C)	193,72
Temperatura máxima permisible del termostato (°C)	250°C

A continuación, se define el delta T (ΔT) que es la diferencia de temperatura entre el vapor saturado y el agua a temperatura ambiente, este valor es necesario para encontrar las pérdidas térmicas establecida en la ecuación (12) y posteriormente encontrar la eficiencia de calentamiento (η_{cal}) la cual viene establecida en la ecuación (19), mostrada a continuación.

$$\eta_{cal} = \frac{|Pot_Q - Perd_T|}{Pot_Q} \cdot 100\% \quad (19)$$

La eficiencia de la caldera la establece el fabricante, en el anexo 1 se observa la eficiencia para varias potencias de la caldera modelo CBEX-2W, en donde se aprecia que con una potencia de 150 BHP y gas natural como combustible se tiene una eficiencia de $82,4 \pm$

0,3%, mientras que la caldera con la misma potencia, pero con gasolina como combustible, se tiene que la eficiencia ronda los $85,6 \pm 0,4\%$. La tolerancia indicada se relaciona con la capacidad de carga de la caldera. Por tanto, la caldera seleccionada debe considerarse una eficiencia entre 82 y 86% según el fabricante

El coeficiente de transferencia de calor apropiado se determina iterando este valor hasta encontrar un valor de eficiencia descrito en la ecuación (19), este valor debe estar entre los rangos descritos por el fabricante.

Para el calentamiento de agua se utiliza la ecuación en espacio de estado para sistemas termodinámicos cerrados. La función step de Matlab realiza una representación de distintos sistemas en un mismo eje coordenado, para el presente caso de estudio dentro de esta función se incluye el producto entre la función de transferencia para el espacio mencionado y la potencia calórica de la caldera, con el tiempo de calentamiento, para de esta manera encontrar el tiempo que demora alcanzar el ΔT previamente mencionado. En la figura 2.4 se observa la función step indicada. (Aguinaga, 2023)

```
%CALENTAMIENTO INICIAL EN LAZO ABIERTO  
step(potq*Gp1,tiempocalentamiento);
```

Figura 2.4 Función step para calentamiento de agua en lazo abierto.

Fuente: Propia

2.3.3 Control del termostato

El control de temperatura en el termostato consiste en el control del encendido y apagado de la llama para que la temperatura este estable dentro del rango establecido. El rango de operación normal de un termostato es alrededor de 600 segundos, esto quiere decir que la temperatura superior máxima del termostato es el ΔT que transcurre en el tiempo de operación del termostato añadido a la temperatura de vapor saturado establecida en la tabla 2.6, lo mismo sucede para la temperatura inferior.

Para determinar el régimen de regulación del termostato en lazo abierto es necesario conocer la entalpía de vaporización del agua para este proceso, esto debido a que se necesita alcanzar la saturación de agua para llegar al vapor. Con la ayuda de la librería "XSteam" de MATLAB se logra determinar la entalpía de vapor saturado (h_g) y la entalpía de líquido saturado (h_L) y mediante la ecuación (20) se logra determinar la entalpía de vaporización. La tabla 2.7 muestra las entalpías de los valores mencionados.

$$h_{evap} = h_S - h_L \quad (20)$$

Tabla 2.7 Entalpías dentro del proceso de calentamiento.

Entalpías dentro del proceso de calentamiento	
Entalpía de líquido saturado (kJ/kg)	824,23
Entalpía de vapor saturado (kJ/kg)	2788,0
Temperatura de vapor saturado en la salida (°C)	196,38

Por otra parte, para calentar el agua hasta el vapor saturado es necesario determinar la potencia calórica de vaporización (Pot_{qvap}) para establecer el tiempo que toma alcanzar el incremento de temperatura descrito en el termostato. La ecuación (21) muestra matemáticamente la potencia de vaporización mencionada. Finalmente se utiliza la función step dentro de la cual se incluye el producto entre la potencia calórica de vaporización y el régimen de funcionamiento del termostato, el cual funciona desde los 600 y 1200 segundos normalmente, en la figura 2.5 se observa la función step descrita. (Aguinaga, 2023)

$$Pot_{qvap} = Pot_Q - h_{evap} \cdot \dot{m} \quad (21)$$

```
%CONTROL DE TEMPERATURA EN CALDERO CON TERMOSTATO (LAZO ABIERTO)
step(potqvap*Gp1,regimen);
```

Figura 2.5 Función step para control de temperatura en el termostato en lazo abierto.

Fuente: Propia

Control de llama del quemador

El control de la llama es importante para fijar la temperatura dentro de los rangos establecidos, lo que se propone es la implementación de un controlador retroalimentado (PID) el cual permite mejorar el funcionamiento del quemador, logrando una eficiencia en el funcionamiento de la planta. El tiempo de reacción entre el encendido y el apagado de la llama debe ser pequeño para reducir la pérdidas caloríficas, por ello se recomienda un delta T corto para que alcance el tiempo de reacción.

Para controlar este proceso termodinámico abierto se utiliza la función “PID Tuner” de MATLAB el cual corrige las ganancias del controlador PID con el fin de buscar la estabilización de los resultados dentro de un tiempo mínimo, consiguiente se utiliza la función “feedback” para lograr llegar al delta T establecido previamente y la curva resultante permite obtener el tiempo de demora del planteamiento definido.

Finalmente se utiliza la función `step`, donde los parámetros son el resultado del “*feedback*” y delta T, el cual para el presente caso de estudio es de 0,2 °C. En la figura 2.6 se observa el control PID en la modulación de llama.

```
%CONTROL PID (MODULACION DE LLAMA)
consignadeltaT=0.2;
[Gc,info]=pidtune(Gp1,'PID',1);
H=feedback(Gp1*Gc,1);
step(consignadeltaT*H);
```

Figura 2.6 Control PID para modulación de llama

Fuente: Propia

2.4 Programación del PLC

2.4.1 Código de programación

A continuación, se realiza la implementación de los datos obtenidos en el software MATLAB, esto se realiza en el software libre STEP 7 MicroWin, en donde se realiza la programación del PLC dentro del cual se utiliza el lenguaje de programación tipo *Ladder*, este lenguaje está basado en esquemas eléctricos de control el cual se implementa como escalera, tal como su nombre lo indica.

El software STEP 7 MicroWin viene acompañando de dos programas complementarios, uno es el S7200 el cual es un PLC virtual en donde se carga el programa realizado en STEP 7, el otro programa es el software PC SIMU en donde se observa gráficamente todas las funciones implementadas en STEP 7. Los programas mencionados son complementarios por lo que el funcionamiento del PC SIMU está acompañado del S7200 y viceversa.

El control de la caldera pirotubular está comprendido de sensores analógicos que transforman la señal física en digital, los sensores implementados son para el control del nivel de agua y el control de temperatura en el termostato, los parámetros establecidos en las tablas 2.1 y 2.5 sirven para el nivel de agua máximo y mínimo respectivamente, y los parámetros establecidos en las tablas 2.3 y 2.6 sirven para la temperatura mínima y máxima respectivamente.

Los sensores analógicos al trabajar con señales físicas reciben parámetros del mismo índole, dentro del software la señal de entrada analógica se representa por “AI”, mientras que la salida analógica se representa por “AQ”.

La transformación de la señal física a digital se la realiza con el transductor implementado en el software S7200, esto se realiza con la implementación de módulos analógicos dentro del propio programa. Dentro de la configuración de los módulos es recomendable utilizar la configuración de 0 a 20 [mA], esto con el fin de diagnosticar el estado del sensor durante la ejecución del programa.

La ejecución del software S7200 considera las señales de entrada y la señales de salida para que el programa PCSIMU pueda ejecutarse. En la figura 2.7 se observa la interfaz gráfica del software S7200 en donde el módulo 0 indica al configuración del módulo analógico para cuatro señales analógicas de entrada.

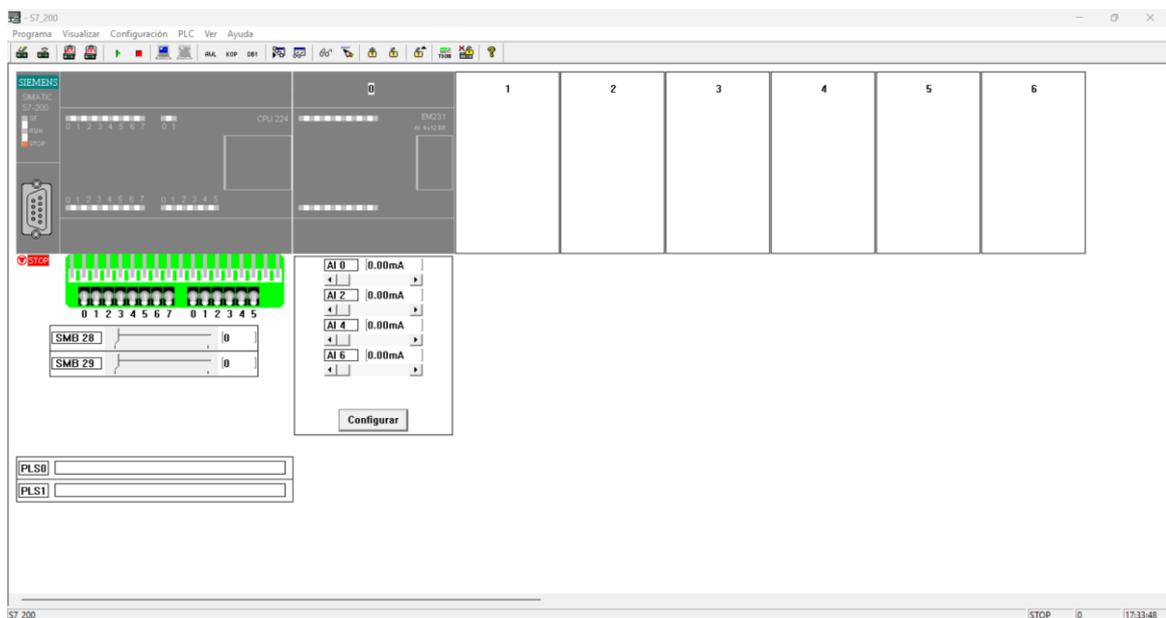


Figura 2.7 Interfaz del software S7200.

Fuente: Propia

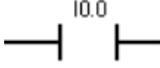
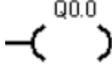
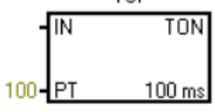
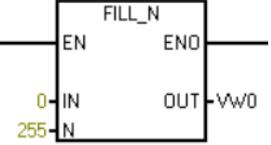
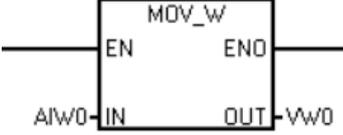
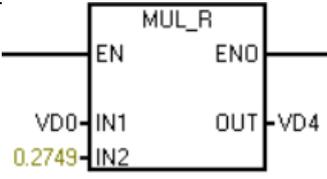
Convertir la señal analógica en digital es parte del proceso de automatización de la caldera, por ello es importante definir los formatos que se utilizan para el control automático de la caldera. El formato bit es la unidad más pequeña de información en un computadora en la cual solo se puede tener el encendido y el apagado representados por 1 y 0 respectivamente. El formato byte se conforma por 8 bit sucesivos, es decir una fila entera de la memoria del PLC.

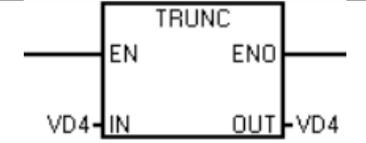
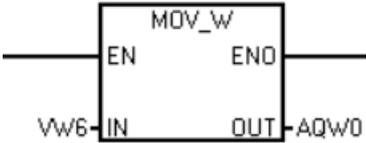
Por otra parte, si se juntan 2 formatos byte se forma un formato palabra, es decir 2 filas de la memoria del PLC, y por último si se juntan 2 formatos palabra se obtiene un formato doble palabra, es decir 4 filas de la memoria del PLC. Todos los formatos indicados necesitan ser almacenados en una memoria variable (V) del PLC (Siemens, 2009). Por ello, el formato palabra de memoria variable (VW) y el formato de doble palabra de memoria

variable (VD) son fundamentales para la programación del PLC debido a que estos me permiten almacenar señales digitales extensas derivadas de las señales físicas del sistema.

En la tabla 2.6 se observa todos bloques insertados en el software STEP7 MicroWin utilizados para la implementación del control automático en caldera pirotubular.

Tabla 2.7 Bloques utilizados en el software STEP7 MicroWin.

Bloques de programación en <i>Ladder</i> .		
Bloque		Función
1		Representación gráfica de un interruptor
2		Representación gráfica de una bobina
3		Temporizador con resolución de 100 [ms], el cual puede ser asignado desde T37 hasta T63 y desde T101-T255
		Rellena una cierta cantidad de datos en formato palabra en las memorias del CPU, este bloque crea 255 filas en formato bit empezando en el formato palabra de memoria variable VW0.
4		Mueve los datos desde el captador analógico 0 (AIW0), es decir la entrada analógica 0 del PLC, hacia el formato palabra VW0.
5		Transforma el formato palabra (VW0) en formato doble palabra (VD0).
6		El valor obtenido en formato doble palabra hay que llevarlo a tipo real, esto para manejar números enteros.
7		Las funciones ADD_R, SUB_R, MUL_R y DIV_R sirve para sumar, restar, multiplicar y dividir respectivamente, este se almacena en las cuatro filas desde VD0 A VD4.

8		<p>Transforma el valor real obtenido en un valor entero en formato doble palabra en la variable de salida indicada.</p>
9		<p>Lleva el valor almacenado en el último formato palabra, hacia la señal digital de salida (AQW0) la cual es el indicador numérico de los límites de operación.</p>

La tabla 2.7 muestra los bloques de programación en Ladder; a continuación, se realiza la explicación del funcionamiento de los bloques mencionados para el control automático del tanque de almacenamiento de agua cuya secuencia de programación se encuentra en el anexo 3, de manera similar se realiza el control automático del termostato.

Para comenzar se debe insertar el interruptor que accione la memoria 0 (M.0.0) y en donde se almacena la información del tanque de agua, luego se debe insertar un interruptor de emergencia con el fin de apagar todas las bobinas y memorias y detener el proceso. Con la activación del interruptor también se activa el FILL_N para crear filas con formato bit para poder almacenar la información recibida por el tanque de agua y por el termómetro.

Seguido se debe mover los datos físicos obtenidos por los sensores hacia M0.0 del PLC, esto se logra mediante MOV_W el cual mueve la señal analógica hacia el primer formato palabra (VW0), luego se debe convertir VW0 a formato doble palabra (VD0) esto es posible gracias al bloque MUL, posteriormente se debe llevar VD0 a un valor del tipo real con la ayuda del bloque DI_R.

El margen del formato palabra es el que se utiliza para la asignación del valor máximo de capacidad de tanque y del termostato. El valor del formato palabra en decimales con signo corresponde entre -32.768 a 32.767. En el anexo 3 el valor correspondiente al primer MUL_R de la secuencia se determina con la ecuación (23), el cual es el producto inverso entre el valor máximo de la caldera y termostato y el valor en decimales positivo del formato palabra.

$$T = \frac{\text{Valor máximo permisible}}{\text{Valor del formato palabra}} = \frac{9000}{32.767} \quad (23)$$

En la tabla 2.8 se observa los valores asignados en el software STEP7 MicroWin para el tanque y para el termostato en base a la ecuación (19) y los valores máximos establecidos en las tablas 2.1 y 2.5 respectivamente.

Tabla 2.8 Valores asignados en el bloque MUL_R.

Valores asignados en el software STEP7 MicroWin		
	Valor decimal asignado	Valor máximo del recipiente
Termostato	0,00762963	250
Tanque	0,2749	9000

Como se muestra en la tabla 2.7 las funciones del ítem 7 sirven como operadores matemáticos para números decimales dentro del PLC. Para insertar dentro del código los límites establecidos previamente para el tanque y el termostato se debe utilizar comparadores lógicos para números reales en el último formato palabra guardado, la figura 2.8 ilustra el código *Ladder* para definir los límites superior e inferior.

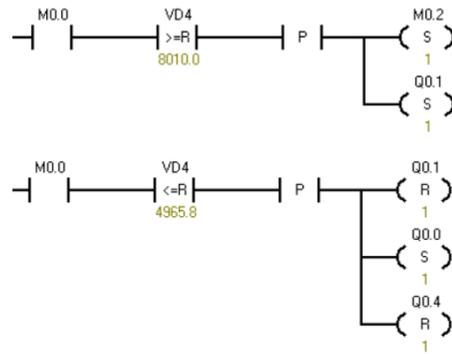


Figura 2.8 Comparadores lógicos para el tanque dentro del PLC

Fuente: Propia

En la primera línea de programación de la figura 2.8 se observa que cuando el formato palabra 4 (VD4) alcanza las 8010 unidades en un flanco positivo (de vacío a lleno) se activa la memoria 2 (M2) perteneciente al termostato y se desactiva la bobina 1 (Q0.0); por otra parte, cuando el formato palabra alcanza las 4965 unidades en un flanco positivo se desactivan las bobinas 1 y 4 (Q0.1 y Q0.4) las cuales entregan el vapor saturado al sistema, por último se activa la bobina 0 (Q0.0) la cual es la válvula de agua que permite que ingrese el líquido al tanque.

Seguido de la definición de los límites por medio de los comparadores, se tiene que usar el bloque TRUNC que llevar el valor real al último formato doble palabra utilizado, finalmente se aplica el bloque MOV_W que lleva el valor almacenado en el formato palabra lleva hacia la señal analógica de salida, este mismo proceso debe implementarse para realizar el control del termostato con el límite de operación establecido en la tabla 2.8.(Aguinaga, 2023)

2.4.2 Elementos de simulación.

La programación en *Ladder* está acompañada con los elementos de programación, los cuales nos permiten observar el funcionamiento del código de manera gráfica, el programa de simulación escogido es el PCSIMU el cual es un software libre complementario al STEP7 MicroWin el cual nos permite observar los resultados del código realizado.

En primera instancia se debe insertar los interruptores de accionamiento (I0.0) y de paro de emergencia (I0.1) los cuales se representan por un botón verde y un botón de emergencia respectivamente, los cuales se observan en la figura 2.9.



Figura 2.9 Comparadores lógicos para el tanque dentro del PLC

Fuente: Propia

Seguido se debe implementar el tanque de almacenamiento de agua con un sensor analógico de captación de agua (AIW0) definidos dentro del código *Ladder* del PLC, este tiene una válvula de entrada de agua (Q0.0), una válvula de salida de vapor saturado (Q0.4) y una quemador (Q0.1) que activa el funcionamiento del termostato. Finalmente se tiene el termostato que tiene un captador de temperatura analógica 2 (AIW2) que detecta la temperatura máxima y mínima de funcionamiento del caldero. En la figura 2.10 se observa una representación de lo descrito previamente.

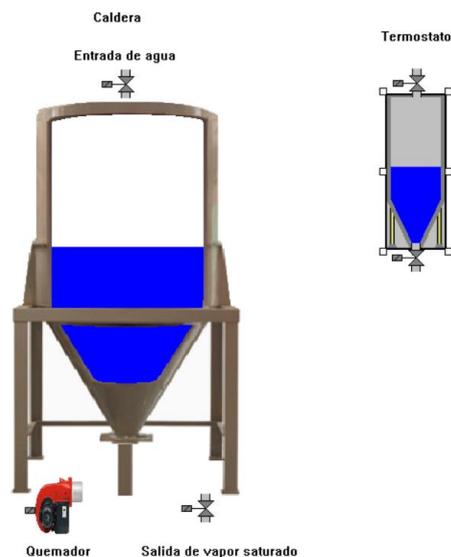


Figura 2.10 Representación del tanque de agua y termostato en PCSIMU.

Fuente: Propia

Las señales analógicas de entrada están representadas mediante el tanque de agua y el termostato las cuales tienen sensores analógicos que determinan los valores máximos y mínimos establecidos.

Para visualizar los niveles de agua, temperatura y presión se debe usar barras numéricas que muestren al usuario los valores establecidos. Para visualizar el nivel del tanque se usa la salida analógica 0 (AQW0), la temperatura usa la salida analógica 2 (AIW2) y la presión usa la salida analógica 4 (AQW4) con los niveles de agua, temperatura y presión establecidos previamente.

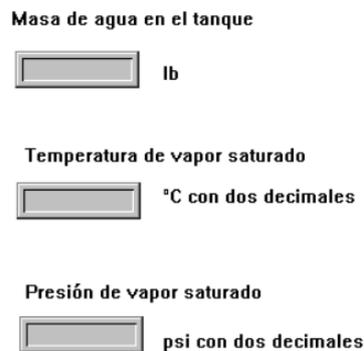


Figura 2.11 Barras numéricas de volumen, presión y temperatura.

Fuente: Propia

La figura 2.11 muestra la representación de las barras numéricas para el nivel de agua, la temperatura de vapor saturado y la presión del vapor saturado. Las barras numéricas muestran el valor numérico de salida guardado en el último formato palabra.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados

3.1.1 Graficas del control en MATLAB

Los parámetros necesarios para el control de calentamiento de agua, control de temperatura en el termostato y control de llama en el quemador se los establece en la metodología, a continuación, se indica las gráficas que son el resultado de la programación descrita, dichos resultados sirven como referencia para su posterior integración en el software libre PCSIMU y STEP 7 MicroWin.

El calentamiento de agua en lazo abierto se expresa en la figura 3.1, en donde se muestra el delta T desde la temperatura ambiente hasta la temperatura timbre establecida con la librería "XSteam".

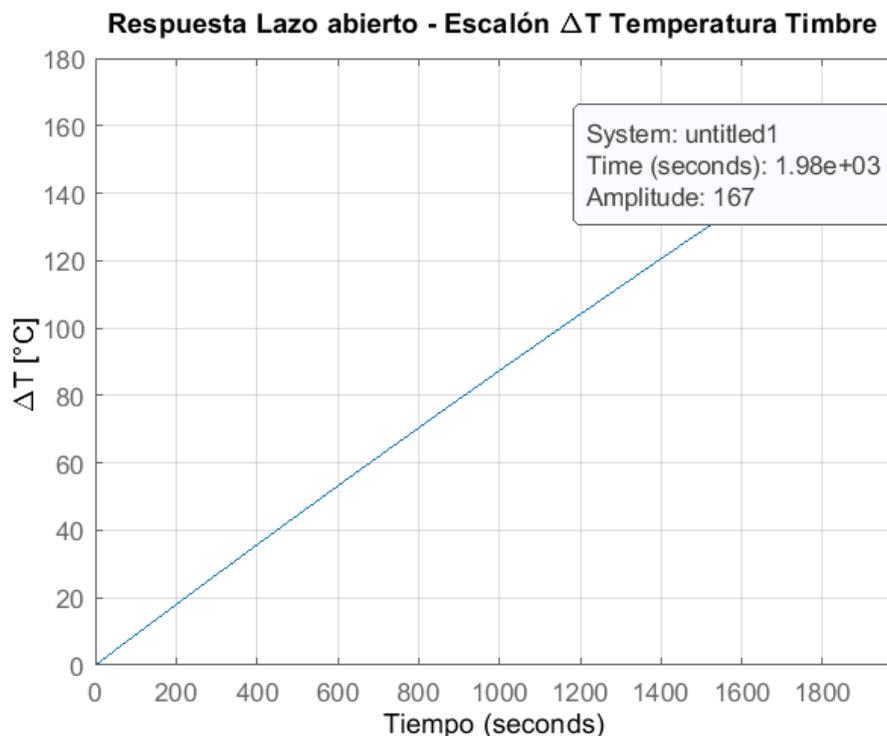


Figura 3.1 Diferencia de temperatura para el calentamiento de agua.

Fuente: Propia

En la figura 3.1 se observa el delta T (ΔT) de 167°C el cual es la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura del vapor saturado establecidos en la tabla 2.3 y 2.5 respectivamente, se observa además que el tiempo para llevar al agua hasta el vapor saturado es de 1980 segundos, lo cual es alrededor de 33 minutos. Por otra parte, se muestra la función de transferencia a partir de la cual se la obtiene la figura 3.1, la cual es

obtenida por medio de la ecuación en espacio de estado para sistemas cerrados en el software MATLAB.

$$GP_1 = \frac{6,153 \cdot 10^{-8}}{s + 7,9191 \cdot 10^{-5}}$$

El funcionamiento óptimo de la caldera viene acompañado de la eficiencia de calentamiento que esta pueda tener, como se establece previamente, el fabricante establece que este modelo de caldera debe alcanzar entre el 82 y 86% de eficiencia. La ecuación (19) indica muestra cómo obtener dicha eficiencia; con la ayuda del software MATLAB se puede iterar hasta encontrar un valor adecuado del coeficiente global de calor (U) que permita una eficiencia de calentamiento indicada por el fabricante.

El resultado de U encontrado mediante las iteraciones varía entre 32 y 40 [$W/K \cdot m^2$] para obtener eficiencias entre 86 y 82% respectivamente, dichos resultados están acorde a resultados experimentales de coeficiente típicos de transferencia global de calor en intercambiadores de calor.

La respuesta en lazo abierto para el control de temperatura en el termostato del vapor saturado en la salida de la caldera se observa en la figura 3.2, en donde se visualiza la temperatura de operación máxima del termostato y el tiempo en el que lo alcanza.

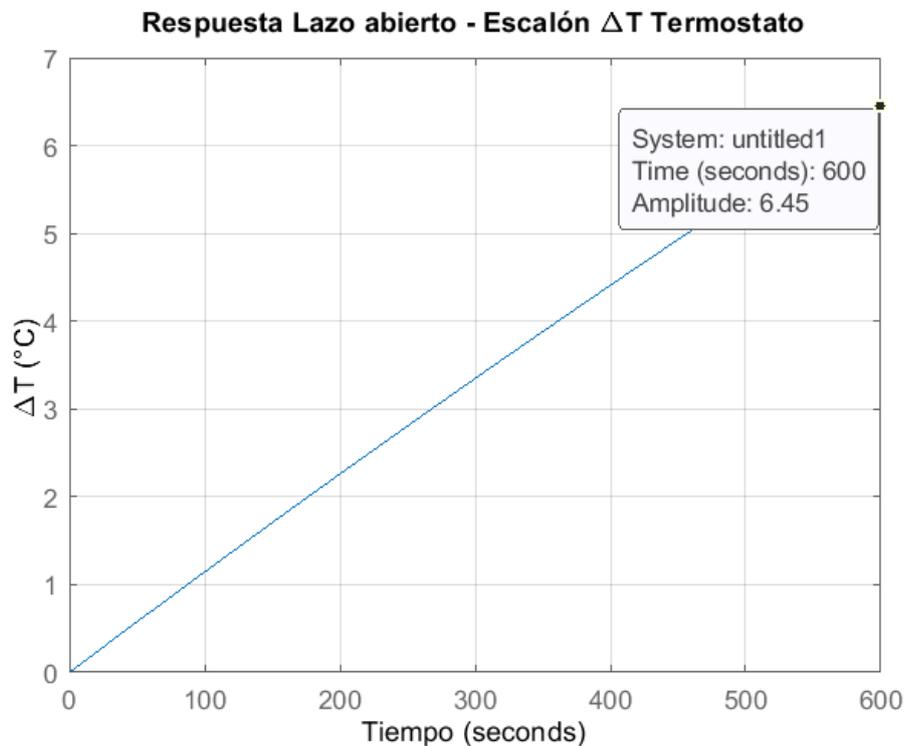


Figura 3.2 Temperatura máxima de operación del termostato.

Fuente: Propia

La figura 3.2 muestra el incremento máximo de temperatura que indica el termostato en un régimen de tiempo de 10 minutos, la curva de temperatura vs tiempo muestra que en el tiempo establecido se alcanza un $\Delta T = 6,45 \text{ }^\circ\text{C}$, este ΔT debe ser añadido y sustraído a la temperatura del vapor saturado a la salida de la caldera. Lo indicado muestra los límites de temperatura del vapor saturado que entrega el caldero. En la tabla 3.1 se muestra el límite máximo y mínimo del vapor saturado que entrega la caldera.

Tabla 3.1 Temperaturas de entrega de vapor indicadas en el termostato.

Temperatura de vapor saturado a la salida	
Temperatura máxima de vapor saturado ($^\circ\text{C}$)	200,17
Temperatura mínima de vapor saturado ($^\circ\text{C}$)	187,27

A continuación, se muestra la función de transferencia para realizar la curva de la figura 3.2, la cual es obtenida por medio de la ecuación en espacio de estado para sistemas abiertos en el software MATLAB.

$$GP_1 = \frac{6,153 \cdot 10^{-8}}{s + 2514 \cdot 10^{-4}}$$

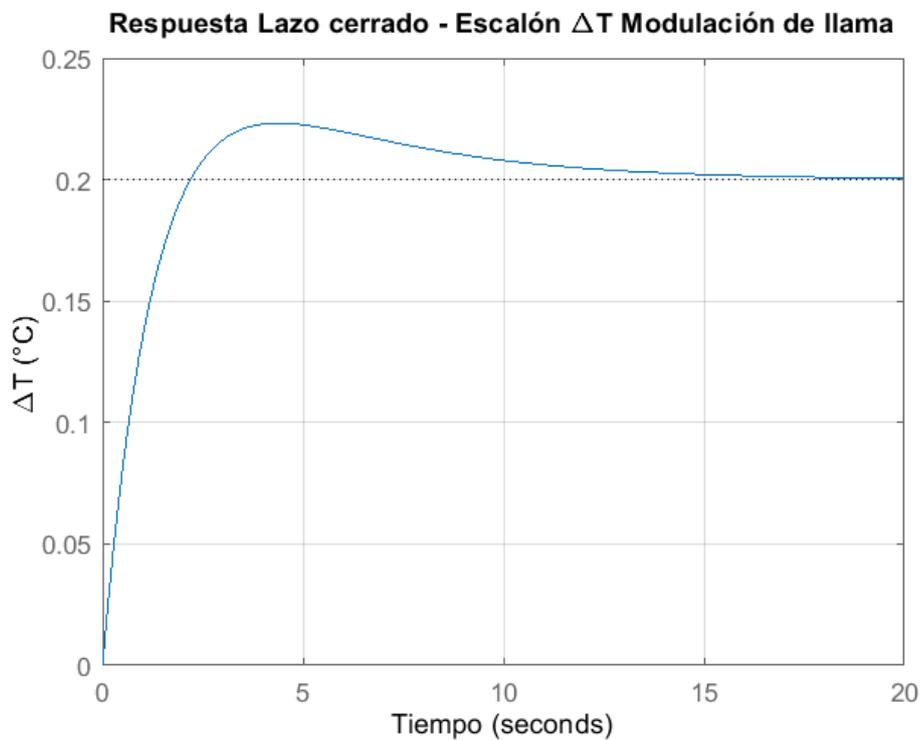


Figura 3.3 Control retroalimentado para el control de la llama.

Fuente: Propia

La respuesta en lazo retroalimentado para el control de la llama de quemador se observa en la figura 3.3, en esta imagen se observa que ΔT logra un estabilización de 0,2 °C en un tiempo de 20 segundos, la estabilidad de la curva indica que la temperatura para calentar el agua se mantiene constante y no sufre perturbaciones que perjudiquen la eficiencia del proceso.

El proceso previo viene acompañado con una ecuación con una función de transferencia, este es el resultado de la ecuación en espacio de estado para sistemas cerrados y con controlador PID como se muestra a continuación.

$$GP_1 = \frac{0,9812 \cdot s + 0,1929}{s^2 + 0,9815 \cdot s + 0,1929}$$

3.1.2 Masa de combustible para la caldera

El calentamiento del agua al interior de la caldera pirotubular se lo realiza con la quema de combustible, en el presente caso de estudio se considera tres combustibles fósiles que ayudan a calentar de agua los cuales son el diésel el bunker y el GLP. La masa de combustible necesario para el funcionamiento de la caldera pirotubular de 150 BHP está dado por la ecuación (24).

$$m_{comb} = \frac{Pot_Q \cdot t_{calentamiento}}{\eta_{burner} \cdot PC_{inf-comb}} \quad (24)$$

La ecuación (24) muestra la masa de combustible necesario para alcanzar la potencia de calentamiento de 150 BHP, los términos empleados son el producto entre la potencia de calentamiento en (MW) y el tiempo de calentamiento del agua, el resultado de este término sobre el producto entre la eficiencia del quemador equivalente al 80 % y el poder calórico del combustible que se esté quemando para el calentamiento de agua. En la tabla 3.2 se observa el poder calórico y la masa en kilogramos y en galones de los combustibles que se utilizan en el país.

Tabla 3.2 Propiedades y masa de los combustibles para el calentamiento de agua.

Combustible	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Masa del Combustible (kg)	Galones de combustible.
Diesel	42,6	85,49	26,61
Bunker	41,282	88,22	23,58
GLP	46	79,17	-

3.1.3 Simulación en PC SIMU

La simulación en PC SIMU funciona simultáneamente con el software S7200, para ejecutar la simulación del software es necesario configurar los módulos del programa S700, por ello es necesario establecer el número de entradas y salidas analógicas disponibles en esta simulación. El programa tiene 2 entras analógicas correspondientes al tanque de almacenamiento de agua y el termostato, por otra parte, se tiene 3 salidas analógicas correspondientes a las barras numéricas de nivel del tanque de agua, el termostato y el manómetro. La configuración del software S700 se observa con los criterios mencionados se observan en la figura 3.4.

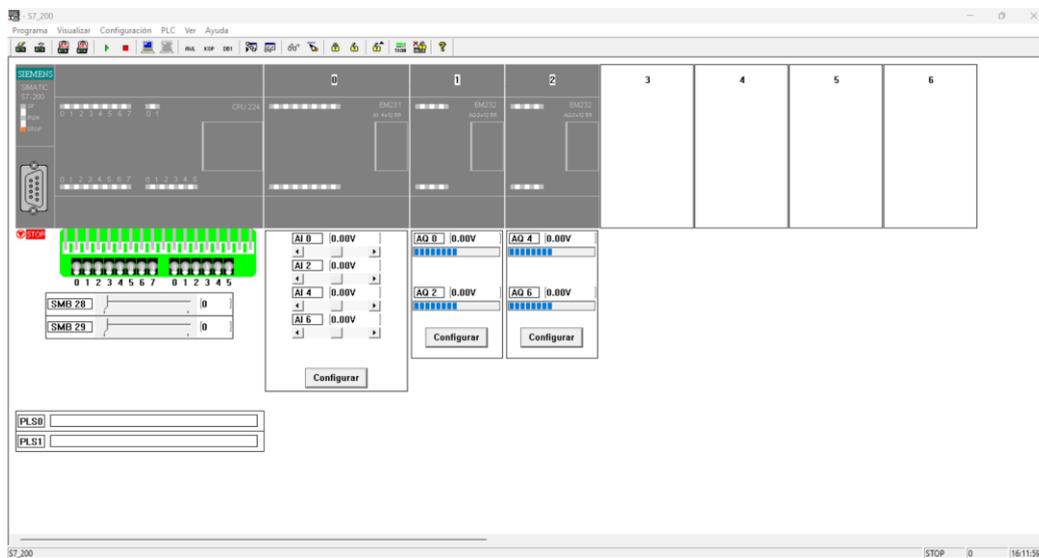


Figura 3.4 Módulos utilizados para el software S7200.

Fuente: Propia

Para ejecutar el PLC el programa tiene que estar cargado en el PLC virtual, para esto en el software STEP7 MicroWin se debe exportar el programa en formato awl y posteriormente cargar el programa en la pestaña programa en la parte superior izquierda.

Una vez cargado el programa en el PLC virtual, se realiza la simulación en el software PCSIMU, esto se hace con la opción simulación en la barra opciones del programa y seguido se realiza la opción RUN. En la figura 3.5 se observa el menú de opciones descrito.

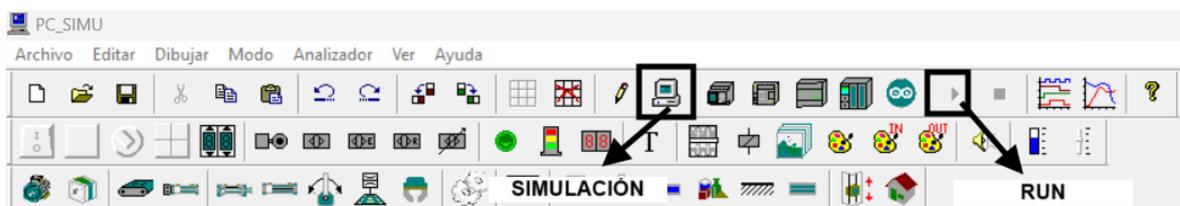


Figura 3.5 Interfaz de usuario de PCSIMU.

Fuente: Propia

Una vez ejecutada la simulación se debe presionar el botón verde (I0.0) para activar la memoria 0 (M0.0) y la válvula de entrada de agua (Q0.0) al tanque de almacenamiento, la memoria 0 ejecuta los sensores analógicos del tanque cuya capacidad se establece en la tabla 2.8. La lectura de la masa de agua en el tanque la establece el barra numérica 0 (QW0) situada a la derecha del tanque. La figura 3.6 ilustra lo mencionado previamente.

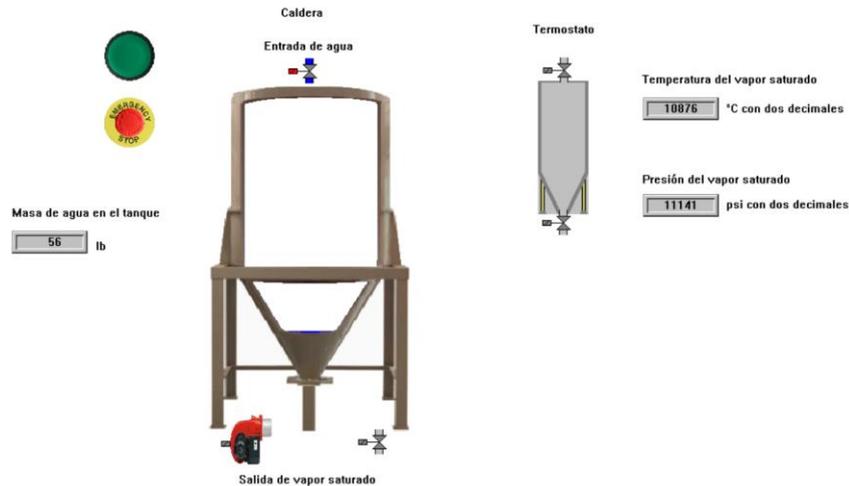


Figura 3.6 Almacenamiento de agua en el software PCSIMU.

Fuente: Propia

Una vez el tanque alcanza el peso normal de agua establecido en la tabla 2.1, se activa la memoria 2 (M0.2) y el quemador de la caldera (Q0.2) para que de esta forma se caliente el agua almacenada el tanque, de la misma forma se activa la barra numérica 2 y 4 (QW2 y QW4) los cuales representan la temperatura del agua al interior del tanque y la presión del vapor respectivamente. En la figura 3.7 se observa el proceso descrito.

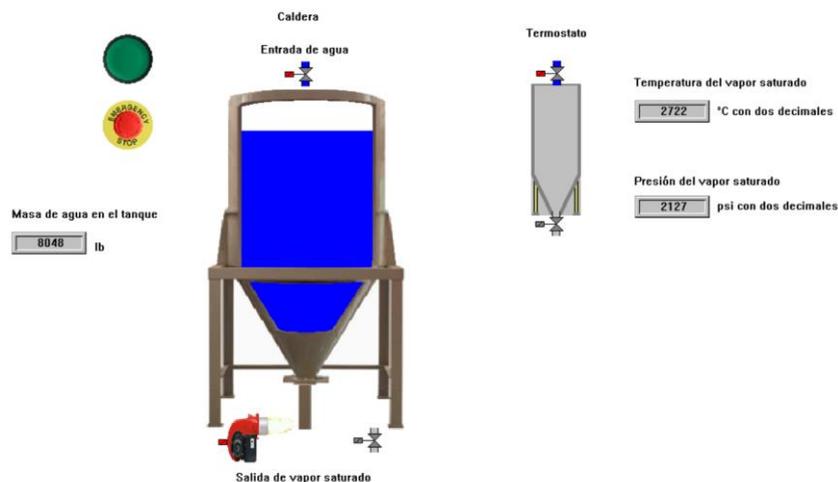


Figura 3.7 Activación del termostato en el software PCSIMU.

Fuente: Propia

En el lado derecho de la barra numérica tanto para el termostato como para manómetro se observa la unidad de medida seguido de la palabra con decimales, esto último hace referencia a la cantidad de decimales que la barra numérica nos ofrece, esto debido a que el software de simulación no puede separar la parte entera de la decimal; el número de decimales admisibles después de la parte entera se obtiene multiplicando por las potencia de diez el valor colocado en el sensor analógico, de esta manera se determina el número de decimales, sin embargo el valor del sensor multiplicado por la décima potencia no debe superar el valor positivo en decimales del formato palabra, debido a que no se puede superar la capacidad máxima del recipiente definido en la tabla 2.8. En la tabla 3.3 se observa el valor máximo del sensor superior para el termostato y el manómetro, así como sus decimales permisibles.

Tabla 3.3 Cantidad de decimales del termostato y manómetro.

Cantidad de decimales en el termostato y manómetro			
	Valor del sensor	Valor máximo del sensor	Número de decimales
Termostato	200,17	20.017	2
Manómetro	200	20.000	2

Cuando el termostato y el manómetro alcanza la temperatura y presión máxima de vapor saturado se desactiva el quemador de la caldera y disminuye la temperatura y presión, debido a que se activa la válvula de gas saturado (Q0.4), la cual entrega vapor saturado para fines industriales, el proceso descrito de observa en la figuras 3.8 y 3.9.

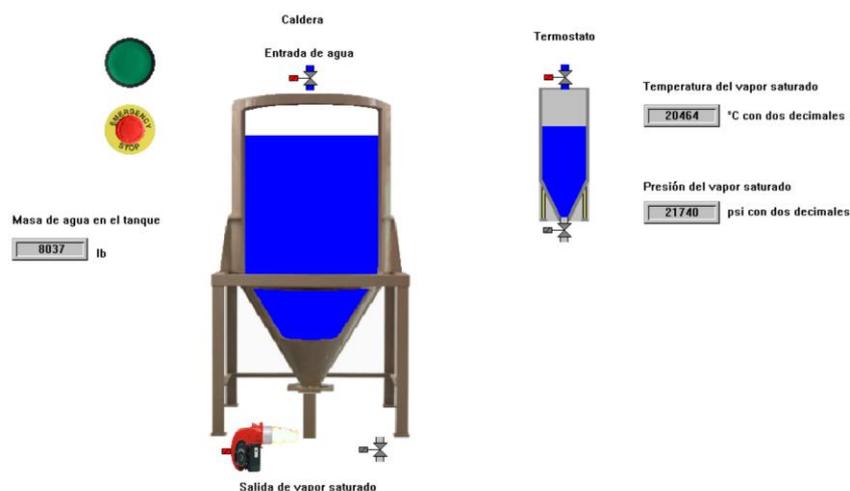


Figura 3.8 Valor máximo de temperatura y presión en el software PCSIMU.

Fuente: Propia

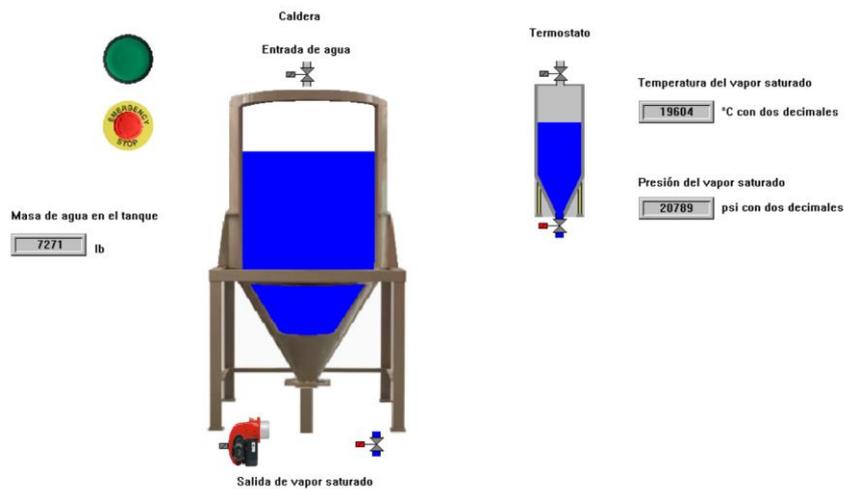


Figura 3.9 Activación de la válvula de gas y desactivación del termostato y manómetro.

Fuente: Propia

Finalmente, cuando se entrega todo el gas saturado y el nivel de agua retorna hacia su punto mínimo el cual se establece en la tabla 2.5, se desactiva la válvula de entrega de gas y se activa la válvula de entrega de agua y el proceso vuelve a repetirse hasta que se presione el botón de paro de emergencia que realiza la desactivación de todas las bobinas y las memorias que se utilizaron durante la ejecución del programa.

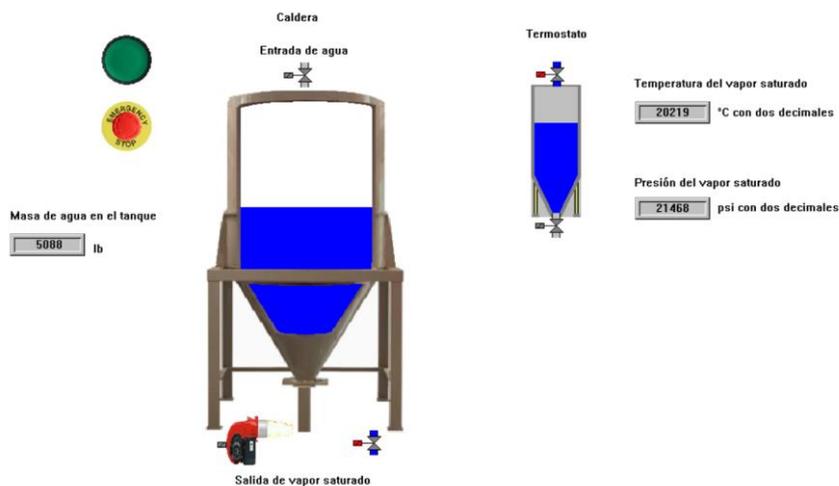


Figura 3.10 Nivel mínimo del tanque de agua en PCSIMU.

Fuente: Propia

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La recolección de información respecto al control automático, sensores, señales análogas y digitales, funcionamiento de calderas pirotubulares entre otros, sirven para determinar los parámetros operativos tanto del tanque como del termostato y del manómetro, además el estudio del programador lógico programable sirve para canalizar la información obtenida en MATLAB e introducirla en este entorno para realizar el control automático del sistema.
- En el desarrollo del componente, se evidencia la importancia de la simulación computacional por encima de la metodología analítica, debido a la facilidad de implementación del modelo matemático en el lenguaje de programación y la rápida interpretación de las curvas de temperatura vs tiempo que otorga el software tanto en lazo abierto y lazo retroalimentado.
- En el planteamiento del modelo matemático se considera un sistema termodinámico abierto para el caso del calentamiento de agua y un sistema cerrado para el caso del control de temperatura en el termostato y el control de la llama, cuya diferencia radica en el intercambio de masa, por ello se definen dos ecuaciones en espacio de estado que son implementadas en el software de programación.
- Las curvas obtenidas en el programa MATLAB situadas en la sección 3.3 del presente trabajo tiene relevancia para establecer los parámetros máximos y mínimos dentro del termostato, mientras que los niveles de agua máximos y mínimos establecidos por el fabricante sirven como referencia para establecer los niveles de agua óptimos para que la caldera se encuentre aportando vapor saturado sin la necesidad de que el operario maneje el sistema.
- El esquema realizado en el software PCSIMU se implementa de acuerdo a la norma IEC 61131, la cual establece los requerimientos para la implementación del PLC, así como elementos de seguridad, esto se puede observar en la sección de resultados en donde se observa un botón de parada de emergencia, el cual apaga el funcionamiento entero de la planta al ocurrir algún problema interno en el sistema.
- El desarrollo de la simulación integra los parámetros mínimos y máximos de temperatura y tiempos de operación obtenidos en MATLAB, los resultados descritos fueron programados en el lenguaje de programación del PLC con el fin de realizar

el control automático de la planta con el objetivo de automatizar el proceso y reducir los tiempos de operación que se pierden en un control manual.

- Se evidenció que para alcanzar una potencia de 150 BHP con el uso de combustibles utilizados a nivel regional el combustible que usa menor cantidad de masa es el GLP seguido del diésel y por el bunker, mientras que en relación los precios establecidos en el país la opción más económica resulta el GLP seguido por el bunker y por último el diésel. El GLP resulta ser la opción más económica debido al subsidio vigente en el país, sin embargo, con el precio establecido en el mercado internacional el uso del gas sería la opción menos rentable.

4.2 Recomendaciones

- Es importante que en el software STEP7 MicroWin cada bloque de programación tenga su propia línea, debido a que al momento de compilar el código se puede evidenciar si existe alguna falla lógica y con ello poder corregirla.
- Para que el programa de simulación es importante que no exista más sensores analógicos de los introducidos en el PLC virtual, debido a que el memorias internas pierden la información previamente programada.
- El uso del control en lazo abierto y retroalimentado para la simulación de los sistemas toma gran importancia para establecer una relación entre la parte teórica establecida y los resultados descritos.
- Para realizar operaciones matemáticas dentro del PLC es importante llevar el formato palabra a formato decimal, caso contrario los sensores analógicos en el interior de recipiente no almacenarán ningún tipo de información.

4.3 Trabajos Futuros

En el presente trabajo se realizó el control automático de un sistema térmico donde se realizó el modelamiento a partir de sistemas termodinámicos, en futuros proyectos es recomendable expandir la investigación realizada en la implementación del control de sistemas mecánicos, hidráulicos o neumáticos para que puedan operar conjuntamente con los sistemas térmicos en la industria, un ejemplo que puede relacionar de manera sinérgica los sistemas mencionados puede ser el control automático de una fundidora de acero, en donde se platearía estudiar el movimiento mecánico de las máquinas mientras se encuentre operando a temperaturas elevadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguinaga, A. (2008). *Control Automático*.

<https://es.scribd.com/document/392529367/Folleto-de-Control-Automatico-2008-a->

Aguinaga

Aguinaga, A. (2023, febrero 13). *Control Automático de Sistemas de Calentamiento*.

Artedínámico. (2022, agosto). *Sistema Termodinámico. Equipos y Laboratorio de Colombia*.

ASHRAE. (2009). *ASHRAE 2009 Fundamentals*.

Bautista, A. (2008, julio 4). *Cálculo de transmisión en elementos constructivos y temperatura de sus superficies* [Mundo HVAC&R].

Boghossian, A., Brown, J., & Zak, S. (2022, octubre 30). *Control de P, I D, PI, PD y PID* [LibreTexts].

[https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/09%3A_Control_proporcional-integral-](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID)

[derivado_\(PID\)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID)

Canales, A. (2007). *Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización* [Infoagro]. https://infoagro.com/riegos/control_riego_y_fertilizacion.htm

carakenio73. (2019, marzo 25). *Definición de Sistema Eléctrico de Potencia* [Dademuchconnection].

<https://dademuchconnection.wordpress.com/2019/03/25/definicion-de-sistema-electrico-de-potencia/>

Castaño, S. (2019, septiembre 7). *Todo sobre Ziegler Nichols—Sintonía de Control PID*. *Control Realimentado*.

https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos

_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID

CleaverBrooks. (2024). *CBEX-2W - 100-800 HP* [Ficha Técnica].

Delgado, J., Orozco, J., & Ruiz, E. (2013). *Solución al problema de desacoplamiento mediante un controlador proporcional difuso de un sistema regular de riego con tuberías en paralelo*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432013000400006

DGOS-DIEM. (2019). *Operación y mantenimiento de calderas de vapor piro-tubulares en establecimientos de salud*. Ministerio de Salud DGOS.

<https://docs.bvsalud.org/biblioref/2019/07/1006654/rm-642-2019-minsa.pdf>

Euro air. (2020, noviembre 26). Partes de una caldera. Componentes y elementos principales [Euro Air Climatización]. *Euro Air Climatización*.

<https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera/>

RAE. (2024, enero 19). *Diccionario panhispánico de dudas* [Real Academia Española].

<https://www.rae.es/dpd/sinergia>

Ridge, B. (2020, junio). *Contactores: ¿Qué son y para que sirven?* [NIVIHE Motores y Accionamientos]. <https://motores-electricos.com.ar/contactores-que-son-y-para-que-sirven/>

Rodríguez, A. (2016, junio 28). *Caldera Piro-tubulares*.

<https://slideplayer.es/slide/13208114/>

Siemens. (2009). *Manual del sistema de automatización S7-200*.

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/582/1109582/att_22068/v1/s7200_sysstem_manual_es-ES.pdf

Voltione. (2020, agosto 28). *¿Qué es un relé y para que sirve?* [Voltione].

<https://voltione.com/pages/que-es-rele>

Wikipedia. (2006). *Diagrama de Bode de un filtro paso bajo Nutterworth de primer orden.*

https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Bode#/media/Archivo:Butterworth_filter_bode_plot.svg

Yonexing, E. (2023, diciembre 12). *¿Qué es un microinterruptor? ¿Para qué se utiliza un*

microinterruptor? [Yxswitches]. <https://es.yxswitches.com/info/what-is-a-micro-switch-used-for-89745279.html>

ANEXOS

ANEXO I. Propiedades de caldera pirotubular CBEX-2W

Table 1: CBEX-2W Steam Boiler Ratings

BOILER H.P.	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
RATINGS - SEA LEVEL TO 700 FT.												
Rated Capacity (lbs-steam/hr from and at 212 °F)	3450	4313	5175	6900	8625	10350	12075	13800	17250	20700	24150	27600
Btu Output (1000 Btu/hr)	3347	4184	5021	6694	8368	10042	11715	13389	16736	20083	23430	26778
APPROXIMATE FUEL CONSUMPTION AT RATED CAPACITY BASED ON NOMINAL 82% EFFICIENCY												
Light Oil gph (140,000 Btu/gal)	29.2	36.4	43.7	58.3	72.9	87.5	102.0	116.6	145.8	174.9	204.1	233.3
Gas CFH (1000 Btu)	4082	5102	6123	8164	10205	12246	14287	16328	20410	24492	28574	32656
Gas (Therm/hr)	40.8	51.0	61.2	81.6	102.0	122.5	142.9	163.3	204.1	244.9	285.7	326.6
POWER REQUIREMENTS - SEA LEVEL TO 700 FT. (60 HZ)												
Blower Motor hp (60 ppm) ^A	7-1/2	7-1/2	5	20	10	15	15	15	30	40	40	60
Blower Motor hp (30 ppm) ^A	7-1/2	7-1/2	7-1/2	20	15	15	15	20	30	50	40	75
Blower Motor hp (9 ppm) ^A	5	7-1/2	7-1/2	15	15	20	15	25	30	50	75	n/a
Blower Motor hp (7 ppm) ^A	5	7-1/2	7-1/2	15	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Blower Motor hp (5 ppm) ^A	n/a	n/a	n/a	n/a	20	30	20	25	30	60	n/a	n/a
Oil Pump Motor, No. 2 Oil	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1
Air Compressor Motor hp (No. 2 Oil firing Only)	3	3	3	3	5	5	5	5	7-1/2	7-1/2	7-1/2	7-1/2
BOILER DATA												
Heating Surface sq ft (Fireside)	417	485	563	750	879	922	1205	1521	1768	1905	2404	2481
Heating Surface sq ft (Waterside)	417.7	483.5	563.7	745.1	855.6	896.8	1170.3	1465.5	1709.9	1840.5	2319.3	2393.2

NOTES:

A. Blower motor size for boiler operating pressures 125 psig and less, contact your local Cleaver-Brooks authorized representative for higher pressures and altitude.

Table 5: CBEX- 2W Fuel-to-Steam Efficiencies Nat. Gas

BHP	OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%
100	82.5	82.4	81.9	81.4
125	82.7	82.7	82.5	82.1
150	82.7	82.7	82.5	82.1
200	82.8	83.0	82.9	82.7
250	82.5	82.4	81.9	81.4
300	82.5	82.4	82.0	81.5
350	82.6	82.6	82.3	81.9
400	83.0	82.8	82.5	82.0
500	83.1	82.9	82.6	82.2
600	83.1	83.0	82.7	82.4
700	83.2	83.1	82.9	82.6
800	83.1	83.1	82.8	82.6

Table 6: CBEX-2W Fuel-to-Steam Efficiencies #2 Oil

BHP	OPERATING PRESSURE = 125 psig			
	% OF LOAD			
	25%	50%	75%	100%
100	85.8	85.7	85.3	84.7
125	86.0	86.1	85.8	85.4
150	86.0	86.1	85.8	85.4
200	86.1	86.3	86.2	86.0
250	82.5	82.4	81.9	81.4
300	85.8	85.7	85.3	84.8
350	85.9	85.9	85.6	85.2
400	86.3	86.2	85.8	85.3
500	86.4	86.2	85.9	85.5
600	86.4	86.3	86.0	85.7
700	86.5	86.4	86.2	85.9
800	86.5	86.4	86.2	85.9

Table 3: CBEX-2W Steam Boiler Dimensions 100-800 HP (Continued)

BOILER H.P.	DIM	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
Surface Blowoff	CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Steam Nozzle (300# ANSI Flange)	DD	4	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8
Blowdown-Front & Rear	EE	1.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2	2	2
Chemical Feed	FF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VENT STACK													
Vent Stack Diameter (Flanged)	AA	16	16	16	16	20	20	24	24	24	24	24	24
MINIMUM CLEARANCES													
Front Door Swing	W	62	62	67	67	78	78	89	89	97	97	104	104
Tube Removal - Front Only	X	89	96	101	120	142	142	160	169	172	187	196	203
Rear Clearance*	-	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
MINIMUM BOILER ROOM LENGTH ALLOWING FOR DOOR SWING AND TUBE REMOVAL:													
Thru Window or Door		235.5	242.5	252	271	310	318	342.5	351.5	362	377	393	400
Front of Boiler		262.5	276.5	286	324	374	382	413.5	431.5	437	467	485	499
WEIGHTS IN LBS													
Normal Water Weight		6,550	6,890	8,010	9,060	11,620	12,190	19,340	19,650	20,060	21,620	25,050	25,870
Approx. Shipping Weight - (150psig)		10,650	11,180	12,520	13,900	17,960	18,540	23,970	24,710	29,300	30,900	38,500	39,450

Dimensions in inches unless noted

Table 3: CBEX-2W Steam Boiler Dimensions 100-800 HP

BOILER H.P.	DIM	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
LENGTHS													
Overall Length (60 PPM system)	A	165	172	176.5	201.5	231.5	242.5	249	265	260.5	282.5	291	299
Overall Length (30 PPM system)	A	167	176	180.5	203.5	233.5	243.5	255	268	271.5	287.5	298	307
Overall Length (9 PPM system)	A	167	176	182.5	205.5	233.5	243.5	255	270	271.5	288.5	300	n/a
Shell	B	137.25	144.25	149	168	196	204	217.5	226.5	229	244	253	260
Base Frame	C	129.5	136.5	140	159	186	194	208.5	217.5	219.5	234.5	243.5	250.5
Front Head Extension (60 PPM system)	D	21.5	21.5	21.5	27.5	29.5	32.5	25.5	32.5	25.5	32.5	32	33
Front Head Extension (30 PPM system)	D	23.5	25.5	25.5	29.5	31.5	33.5	31.5	35.5	36.5	37.5	39	41
Front Head Extension (9 PPM system)	D	23.5	25.5	27.5	31.5	31.5	33.5	31.5	37.5	36.5	38.5	41	n/a
Front Ring Flange to Panel	E	46	46	48	48	47	47	57	57	52	52	52	52
Rear Ring Flange to Base	F	7.75	7.75	9	9	10	10	9	9	9.5	9.5	9.5	9.5
Shell Flange to Steam Nozzle	G	62.5	66	73.5	75.5	96.5	100.5	106.5	111	114.5	122	126.5	130
WIDTHS													
Overall Width	H	81	81	86	86	94	94	105	105	112	112	119	119
I.D. Boiler	J	55	55	60	60	67	67	78	78	85	85	92	92
Center to Water Column	K	42.5	42.5	45	45	48.5	48.5	54	54	57.5	57.5	61	61
Center to Panel	L	44.5	44.5	47	47	50.5	50.5	56	56	59.5	59.5	63	63
Center to Lagging	M	30.5	30.5	33	33	36.5	36.5	42	42	45.5	45.5	49	49
Center to Auxiliary LWCO	N	36.5	36.5	39	39	43.5	43.5	49	49	52.5	52.5	56	56
Base Outside	O	47.5	47.5	52.5	52.5	51	51	64	64	60	60	68	68
Base Inside	P	39.5	39.5	44.5	44.5	43	43	56	56	47	47	55	55
HEIGHTS													
Overall Height	Q	81.5	81.5	87	87	101.5	101.5	113	113	122	122	130	130
Base to Vent Outlet	R	81	81	87	87	94.5	94.5	108	108	114.5	114.5	122.5	122.5
Base to Boiler Centerline	S	41	41	46	46	50	50	56.5	56.5	61	61	65.5	65.5
Height of Base Frame	T	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Base to Bottom of Panel	U	17	17	17	17	20	20	24	24	23	23	23	23
Base to Steam Outlet	V	78.5	78.5	82.5	82.5	90	90	102	102	110	110	118	118
BOILER CONNECTIONS													
Feedwater Inlet	BB	1.25	1.5	1.5	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

ANEXO II. Control de calentamiento en MATLAB del caldero

```

%CONTROL DEL CALENTAMIENTO DE UN CALDERO DE VAPOR SATURADO DE 150 BHP
clc
clear

%COEFICIENTES
l=140*0.0254; %largo de caldero (m) pg6
di=60*0.0254; %diametro interno del caldero (m)
Ac=2*pi*di^(2)/4+2*pi*di*l; %area de transferencia de calor en (m2)
%rho=998.6; %densidad del agua (kg/m3)
m=8010/2.2; %masa del agua (kg) pg 7

Patm=14.7/14.6959; %Presion atmosferica
Tamb=26; %Temperatura ambiente
Psteam=200/14.6959; %Presion del vapor

Tf_s=XSteam('Tsat_p',Psteam);
cp_w=XSteam('Cp_pT',Patm,Tamb)*1000;%Calor especifico del agua
cp_s=XSteam('CpL_p',Psteam)*1000;%Calor especifico del vapor
if cp_w >= cp_s
    Cp=cp_w;
else
    Cp=cp_s;
end

T_amb=Tamb+273.15; %Temperatura ambiente (°K)
T_final=Tf_s+273.15; %Temperatura final del agua (°K)
deltaT=T_final-T_amb; %Consigna incremento de temperatura (°K)
tiempocalentamiento=1980;%Tiempo de calentamiento de 2 horas (s)
U=31; %Coeficiente global de T.C (W/°K-m2)
perd=U*Ac; %Cálculo de las pérdidas unitarias (W/°K)
perdidas=U*Ac*deltaT; %Cálculo de las perdidas totales (W)
potq=150*9809.5; %potencia calorica de 150 BHP (W)
eficiencia calentamiento=(potq-perdidas)*100/potq; %eficiencia calentamiento
mflujo=5175/(2.2*3600); %(kg/s) rated capacity

%SISTEMA TERMODINÁMICO CERRADO
%MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS "para espacios cerrados"
A=[-perd/(m*Cp)];
B=[1/(m*Cp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1)

%CALENTAMIENTO INICIAL EN LAZO ABIERTO
step(potq*Gp1,tiempocalentamiento);
%solamente funciona en lazo abierto para sistema termodinámico cerrado
%(hasta presion o temperatura timbre en termostato deltaT)
grid on
title('Respuesta Lazo abierto - Escalón \DeltaT Temperatura Timbre')
xlabel('Tiempo')
ylabel('\DeltaT [°C]')
pause

%_control de temperatura en caldero con termostato (lazo abierto)

```

```

A=[(-mflujo/m)-(perd/(m*Cp))];
B=[1/(m*Cp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1)

%CONTROL DE TEMPERATURA EN CALDERO CON TERMOSTATO (LAZO ABIERTO)
h_L=XSteam('hL_p',Psteam);
h_s=XSteam('hV_p',Psteam);
h_fg=(h_s-h_L)*1000; %entalpia de evaporización en J/kg
regimen=600; %normalmente regimen entre 600 s (pequeños) y 1200 s (grandes)
potqvap=potq-h_fg*mflujo;
%Normalmente termostato se calibra subir 5°C en regimen
step(potqvap*Gp1,regimen);
grid on
title('Respuesta Lazo abierto - Escalón \DeltaT Termostato')
xlabel('Tiempo')
ylabel('\DeltaT (°C)')
pause

%CONTROL PID (MODULACION DE LLAMA)
%el termostato funciona como control solo en lazo abierto
consignadeltaT=0.2; %para mantener la temperatura lo mas constante posible
[Gc,info]=pidtune(Gp1,'PID',1); %filtro de tiempo
H=feedback(Gp1*Gc,1)
step(consignadeltaT*H)

grid on
title('Respuesta Lazo cerrado - Escalón \DeltaT Modulación de llama')
xlabel('Tiempo')
ylabel('\DeltaT (°C)')

% MASA DE COMBUSTIBLE NECESARIO
pcidiesel=42.6; % poder calórico inferior del diesel MJ/kg
pcibunker=41.282; % poder calórico inferior del bunker MJ/kg
pciGLP=46; % poder calórico inferior del GLP MJ/kg
potqkW=potq/1000; %Potencia en kW
MJ=potqkW*tiempocalentamiento/1000; %Energia en MW
eficienciaburner=0.8; % eficiencia burner
masadiesel=MJ/(eficienciaburner*pcidiesel); % en kg
masabunker=MJ/(eficienciaburner*pcibunker); % en kg
masaGLP=MJ/(eficienciaburner*pciGLP); % en kg
galonesdiesel=masadiesel*(1000/(850*3.78));
galonesbunker=masabunker*(1000/(989.7*3.78));

fprintf("La masa de diesel necesario es de %4.2f kg\n",masadiesel)
fprintf("La masa de bunker necesario es de %4.2f kg\n",masabunker)
fprintf("La masa de GLP necesario es de %4.2f kg\n",masaGLP)
fprintf("Los galones de diesel necesarios son %4.2f galones\n",galonesdiesel)
fprintf("Los galones de bunker necesario son %4.2f galones\n",galonesbunker)

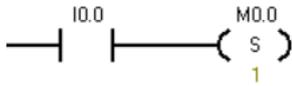
```

ANEXO III. Programación en STEP7 MicroWin

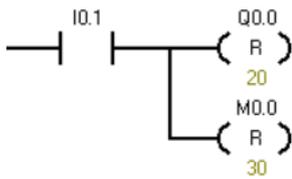
COMENTARIOS DEL PROGRAMA

Network 1 Título de segmento

Comentario de segmento



Network 2



Network 3



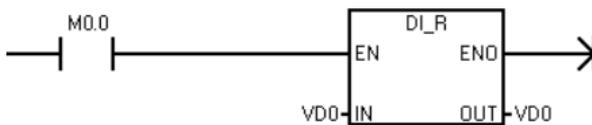
Network 4



Network 5



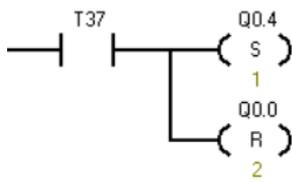
Network 6



Network 7



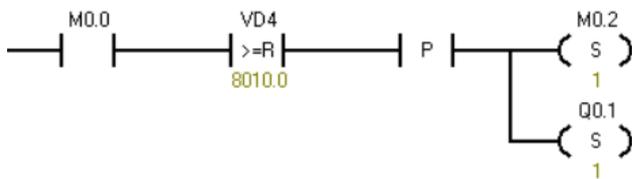
Network 8



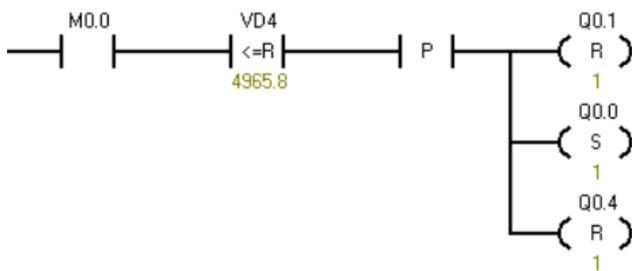
Network 9



Network 10



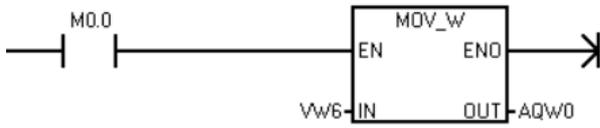
Network 11



Network 12



Network 13



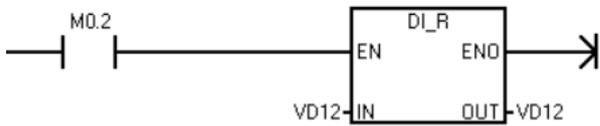
Network 14



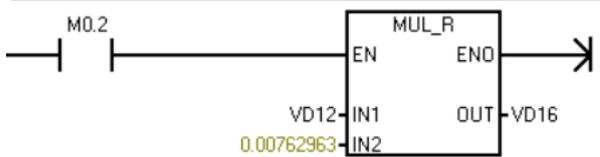
Network 15



Network 16



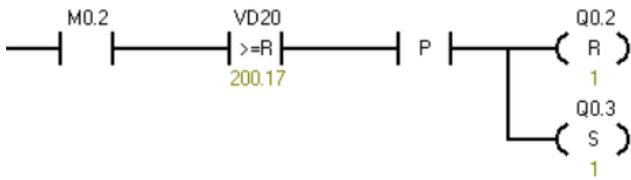
Network 17



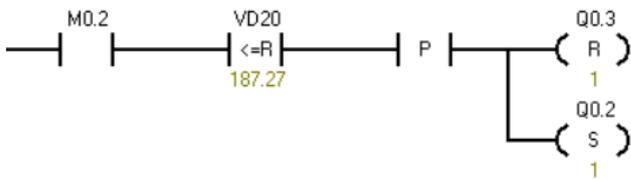
Network 18



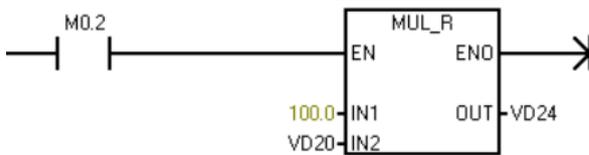
Network 19



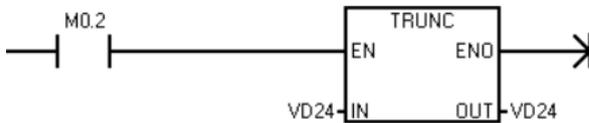
Network 20



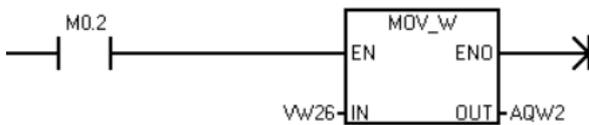
Network 21



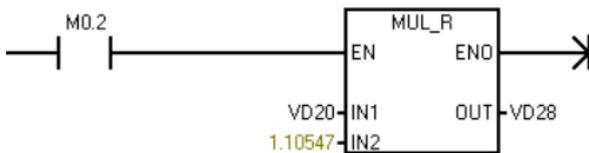
Network 22



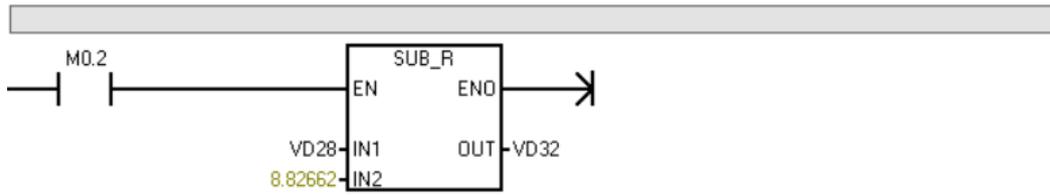
Network 23



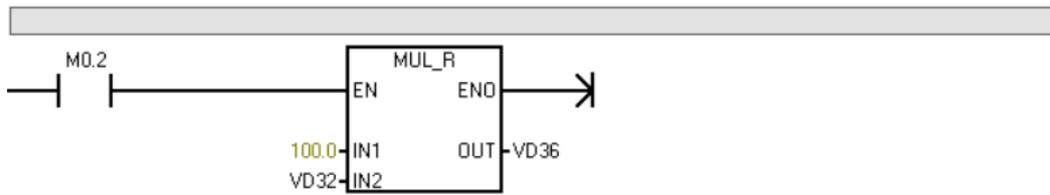
Network 24



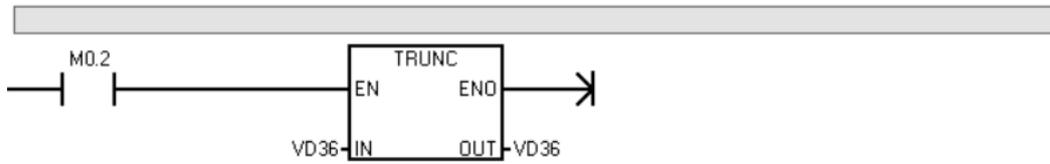
Network 25



Network 26



Network 27



Network 28

