



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero(a) en Automática

Autor

David Gómez Pompa

Tutor

Ing. Rogelio Ramírez Sola

Noviembre, 2023



UNIVERSIDAD
DE ORIENTEFacultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

TRABAJO DE DIPLOMA

Titulo

"Identificación experimental y diseño de control para el comportamiento de la presión de vapor de la caldera pirotubular de la UEB "El Dietético".

> Autor **David Gómez Pompa**

Tutor Ing. Rogelio Ramírez Sola

Noviembre, 2023



Facultad de Ingeniería Eléctrica Departamento de Automática

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

 Nombre y firma del Tutor
 Fecha

 Nombre y firma del Jefe de Carrera
 Fecha

 Nombre y firma del Jefe de Departamento
 Fecha

Dedicatoria

"A mis amados padres, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de este emocionante viaje académico. Su amor, paciencia y aliento constante han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por creer en mí y por ser mi fuente de inspiración.

A mi querida novia, Melisa, tu amor y apoyo inquebrantables han sido mi mayor fortaleza durante estos intensos años de estudio. Tus palabras de aliento y tu comprensión infinita han iluminado mi camino en los momentos más desafiantes. Esta tesis es también tuya, ya que has sido mi compañera de vida y de sueños. A mi querida tía Eugenia, aunque ya no estés físicamente presente, quiero agradecerte por el amor incondicional y el apoyo que me brindaste a lo largo de mi vida. Tus palabras sabias y tu cariño siempre me motivaron a dar lo mejor de mí. Tu partida dejó un vacío en mi corazón, pero tu recuerdo y tu influencia positiva perduran en cada paso que doy. Esta tesis lleva con ella el amor y la gratitud que siento hacia ti.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mis queridos compañeros de cuarto y de beca, con quienes he compartido estos años y su apoyo ha sido fundamental para llegar a este momento. A mis amigos que a pesar de la distancia siempre estuvieron pendientes de mi progreso.

También quiero agradecer de manera especial a mi tutor de tesis el Ing. Rogelio por su tiempo, orientación, valiosos aportes y paciencia durante todo el desarrollo de este trabajo. De la misma forma agradezco a la profesora Mónica por su valiosa guía y conocimientos brindados.

Por último, mi más profundo agradecimiento a mi familia por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años. A mis padres y a mi novia por creer en mí y enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

Sin el apoyo y colaboración recibidos de todas estas personas especiales, no habría sido posible alcanzar este importante logro en mi formación profesional. Les estaré eternamente agradecido.

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

Btu: Unidad Térmica Británica.

Kp: ganancia proporcional del controlador.

Mp: Máximo sobrepaso.

PI: Proporcional-Integral.

PID: Proporcional-Integral-Derivativo.

rpm: Revoluciones por minuto.

Td: Tiempo derivativo.

Ti: Tiempo Integral.

TRF: Transformada Rápida de Fourier.

VM: Variable manipulada.

VC: Variable controlada.

Listado de imágenes

Figura 1.1: Caldera o generador de vapor7
Figura 1.2: Partes principales de una caldera7
Figura 1.3: Caldera de vapor acuotubular9
Figura 1.4: Caldera de vapor pirotubular10
Figura 1.5: Diagrama de bloques de un sistema de control de calderas 11
Figura 1.6: Diagrama tecnológico del sistema de abastecimiento de combustible
Figura 1.7: Diagrama tecnológico del sistema de preparación de combustible 16
Figura 1.8: Diagrama tecnológico de alimentación de combustible al quemador
Figura 1.9: Caldera pirotubular 293R12 18
Figura 1.10: Válvulas termostáticas autoaccionadas
Figura 1.11: Bomba de agua CR16-100 20
Figura 1.12: Presostato KP5-37 21
Figura 1.13: Quemador modelo GI 420 DSPN-D 21
Figura 1.14: Controlador del quemador LFL 1.333 22
Figura 1.15: Disco con tornillos que regula el caudal del combustible
Figura 2.1: Esquema general de identificación28
Figura 2.2: Prueba paso escalón para una entrada entre 0%-5.9%
Figura 2.3: Grafico de señal de entrada y salida en el dominio de la frecuencia utilizando TRF
Figura 2.4: Ventana de modelado de proceso de la herramienta de identificación de sistemas
Figura 2.5: Respuesta transitoria al paso escalón del modelo obtenido de primer orden
Figura 2.6: Respuesta transitoria al paso escalón para el modelo de 2do orden

Figura 2.7: Respuesta transitoria al paso escalón del modelo obtenido de	3er
orden	. 33
Figura 2.8: Salida de los modelos estimados	. 34
Figura 2.9: Gráfica de polo y ceros del modelo seleccionado	. 36
Figura 2.10: Diagrama de control de la presión de vapor en la caldera objeto estudio	o de . 37
Figura 2.11: Comparación grafica de los controladores diseñados	. 37

Listado de tablas

Tabla 2.1: Índices de performance para los modelos del lazo de la presión	. 35
Tabla 2.2: Constantes de tiempo halladas por el pidTuner	. 38

Resumen

Debido a la necesidad existente en la UEB "El Dietético" de Bayamo de mejorar el control y el rendimiento de la caldera pirotubular, este trabajo se enfoca en la identificación experimental y el diseño de un controlador para el comportamiento de la presión de vapor en dicha caldera. El objetivo principal es obtener un modelo matemático dinámico que describa el sistema y utilizarlo para diseñar estrategias de control eficientes.

La investigación se centra en técnicas de identificación y control de calderas pirotubulares, así como en los requisitos específicos de la caldera de la UEB "El Dietético". Se realizan experimentos para recopilar datos sobre la presión de vapor y otras variables relevantes, y se utiliza el software MATLAB como herramienta de cálculo para el procesamiento de los datos y la creación del modelo matemático.

Se describe el proceso de identificación experimental, donde se utilizan técnicas de análisis de datos y el Toolbox de identificación de MATLAB para obtener el modelo matemático deseado. Se validan los modelos obtenidos utilizando los datos experimentales y se presentan los resultados de la identificación.

Finalmente, se realiza una valoración económica y medioambiental del nuevo controlador diseñado para la caldera pirotubular. Esto implica evaluar los posibles beneficios en términos de eficiencia energética, reducción de costos operativos y emisiones de gases de efecto invernadero.

Abstract

Due to the existing need at UEB "EI Dietético" in Bayamo to improve the control and performance of the firetube boiler, this work focuses on experimental identification and controller design for the vapor pressure behavior in the boiler. The main objective is to obtain a dynamic mathematical model that describes the system and use it to design efficient control strategies.

The research focuses on identification and control techniques for firetube boilers, as well as the specific requirements of UEB "EI Dietético" boiler. Experiments are conducted to collect data on vapor pressure and other relevant variables, and the MATLAB software is used as a calculation tool for data processing and model creation.

The process of experimental identification is described, where data analysis techniques and the MATLAB Identification Toolbox are employed to obtain the desired mathematical model. The obtained models are validated using experimental data, and the results of the identification are presented.

Finally, an economic and environmental assessment is conducted for the newly designed controller for the firetube boiler. This involves evaluating potential benefits in terms of energy efficiency, operational cost reduction, and greenhouse gas emissions.

ÍNDICE

Listado	de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas I
Listado	de imágenes II
Listado	de tablasIV
Resume	enV
Abstract	etVI
INTROE	DUCCION1
CAPITU	JLO 1. Fundamentación teórica de las calderas de vapor y control de la
presión	en las calderas de vapor5
1.1	Introducción5
1.2	Generalidades de los generadores de vapor6
1.3	Caleras de vapor6
1.3	Partes de una caldera7
1.4	Clasificación de los tipos de calderas según el contenido de los tubos 8
1.4.	.1 Calderas de tubos de agua o acuotubulares
1.4.	.2 Calderas de tubos de fuego o pirotubulares 10
1.5	Controles utilizados en las calderas de vapor 11
1.5.	.1 Control por la demanda de velocidad de combustión 12
1.5.	.2 Control de relación de la salida con los cambios en la combustión13
1.5.	.3 Control de la presión de vapor o del flujo de vapor
1.6 Si	istema de generación de vapor en la UEB ''El Dietético''
1.6.	.1 Sistema de combustible fuel-oil14
1.7 empre	Sistema de generación de vapor en la caldera pirotubular 293R12 de la esa de productos lácteos UEB ''El Dietético'' de Bayamo
1.8	Levantamiento instrumental de la caldera objeto de estudio 18
1.8.	.1 Caldera pirotubular 293R1218
1.8.	.2 Válvulas termostáticas autoaccionadas

1.8.3 Bombas de agua CR16-100	20
1.8.4 Presostato Tipo KP5-37	20
1.8.5 Quemador GI 420 DSPN-D	21
1.8.6 Control del quemador	
1.8.6 Disco con tornillos que regula el caudal del combustible	22
1.9 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas	
1.9.1 Métodos de obtención de un modelo	23
1.10 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB	25
Conclusiones parciales	25
Capítulo 2. Identificación experimental y resultados del comportamiento de la presión de vapor	dinámico 27
2.1 Planificación experimental y selección de las variables de entrada	a y salida
2.3 Análisis de ruido	30
2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático	30 31
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático 2.6 Validación y selección del modelo matemático 	30 31 34
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático 2.6 Validación y selección del modelo matemático 2.6.1 Análisis de polo y ceros del modelo seleccionado 	30 31 34 35
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático 2.6 Validación y selección del modelo matemático 2.6.1 Análisis de polo y ceros del modelo seleccionado 2.7 Diseño de un controlador para la presión en la caldera objeto de 	30 31 34 35 e estudio 36
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático 2.6 Validación y selección del modelo matemático 2.6.1 Análisis de polo y ceros del modelo seleccionado 2.7 Diseño de un controlador para la presión en la caldera objeto d 2.8 Ajustes del controlador 	30 31 34 35 e estudio 36 37
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático	
 2.3 Análisis de ruido	
 2.3 Análisis de ruido	
 2.3 Análisis de ruido 2.4 Estimación del modelo matemático 2.6 Validación y selección del modelo matemático 2.6.1 Análisis de polo y ceros del modelo seleccionado 2.7 Diseño de un controlador para la presión en la caldera objeto d 2.8 Ajustes del controlador	
 2.3 Análisis de ruido	

INTRODUCCION

La automatización e instrumentación de procesos industriales ha evolucionado considerablemente a nivel internacional en las últimas décadas. En el caso particular de las calderas, se ha pasado de controles analógicos simples a sofisticados sistemas de control lógico programable que permiten una gestión remota y en tiempo real de los procesos. Esto ha traído grandes beneficios en términos de eficiencia energética, seguridad y calidad de producción [1].

Sin embargo, en Cuba el desarrollo tecnológico ha enfrentado limitaciones económicas que relegaron su automatización industrial. Si bien desde la década de 1970 se impulsó un programa nacional en esta rama, con énfasis en la industria alimentaria y química, el período especial del decenio de 1990 truncó su evolución al quedar desactualizados muchos equipos.

Actualmente predomina el uso de sistemas de control primario y obsolescencia de infraestructura en procesos térmicos como las calderas, demandando actualizaciones. Dado que las calderas son un equipo estratégico en dicha industria, el retraso tecnológico descrito en automatización demanda su modernización, a fin de garantizar de forma confiable los procesos térmicos necesarios para la elaboración segura y eficiente de productos lácteos en el país [1].

Por lo tanto, existe una relación entre la situación actual de las calderas a nivel nacional expuesta, y la necesidad de actualizar sus sistemas de control para cumplir cabalmente el rol crucial que cumplen en la industria alimentaria láctea cubana.

La Unidad Empresarial de Base (UEB) "El Dietético" del municipio Bayamo, provincia Granma, es una importante empresa productora de derivados lácteos como leche condensada, harina lacteada, leche evaporada, entre otros, tanto para el mercado nacional como en divisa. Dentro de la Empresa Productos Lácteos Bayamo, El Dietético ocupa un lugar relevante económico, político y socialmente. Su gran capacidad de producción le permite elaborar un amplio surtido de productos lácteos como yogurt natural y de soya, leche condensada azucarada, siropes, queso, mantequilla, entre otros.

Para los diferentes procesos productivos, El Dietético cuenta con un sistema de generación de vapor basado en una caldera pirotubular 293R12 de desarrollo horizontal con tubos de triple paso y producción de 12000 kg/h de vapor. Esta planta de generación recibe agua suave de un tanque de alimentación de $5m^3$ que abastece la caldera. Para su funcionamiento, la caldera utiliza fuel-oil almacenado en dos tanques de 63 000 litros como fluido principal. De esta forma, "El Dietético" garantiza la generación sostenida de vapor necesaria para sus diversos procesos productivos lácteos.

El sistema de control de presión de vapor de la caldera en El Dietético actualmente posee deficiencias, específicamente, la planta de generación de vapor utiliza equipos obsoletos para medir y controlar la presión, por lo que esta variable crucial depende única y exclusivamente de la intervención del personal a cargo. Además, algunos parámetros como la presión se controlan de manera local en la caldera sin posibilidad de supervisión remota ni registros históricos, dificultando el monitoreo y seguimiento continuo.

Actualmente, en la UEB "El Dietético" se está investigando cómo mejorar el control y prestaciones de su caldera pirotubular, lo que incluye la implementación de un sistema de control avanzado. Esto supone obtener un modelo matemático confiable que represente el comportamiento del proceso, el cual es complejo dado que la presión de vapor depende de diversos factores como la entrada de combustible y otras variables.

Cuando no existen reguladores automáticos, el sistema es muy inestable dado por la interacción de estas variables. Sin embargo, la caldera tiene inercia térmica que amortigua los cambios, actuando como un sistema de almacenamiento de energía. Además, al ser un proceso de parámetros distribuidos, la presión no es la misma en toda la cámara de combustión. Por lo tanto, la obtención de un buen modelo matemático que represente

2

adecuadamente estas características es fundamental para poder desarrollar posteriormente un sistema de control avanzado.

En la actualidad, existe la necesidad en la UEB "El Dietético" de disponer de este modelo matemático de la presión de vapor en su caldera pirotubular 293R12, que permita caracterizar su dinámica y sentar las bases para la implementación de un control automático que mejore su operación de forma segura y eficiente.

Por este motivo se plantea como **problema de la investigación** la necesidad que existe en la UEB "El Dietético" de Bayamo, de disponer de un modelo matemático de la presión de vapor en la caldera pirotubular 293R12, por ello el **objeto de esta investigación** lo constituye la identificación experimental de la presión de vapor en la caldera pirotubular 293R12.

Para resolver el problema planteado se traza como **objetivo de la investigación** obtener un modelo matemático dinámico de la caldera pirotubular 293R12 por la vía de la identificación experimental, que relacione la entrada de flujo del combustible y la presión de vapor, empleando como herramienta de cálculo el programa MATLAB.

El **campo de la investigación** es la modelación y sintonización del controlador para la presión de vapor en la caldera pirotubular 293R12.

Como **hipótesis** se plantea que, si se obtiene un modelo matemático dinámico de la caldera pirotubular por vía de la identificación experimental para la presión de vapor, se podrá analizar el comportamiento del proceso en diferentes situaciones, lo que permitirá más adelante el diseño de un sistema de control capaz de mejorar las prestaciones de este equipo.

Significación práctica:

Esto puede impactar directamente en menores consumos, tiempos ociosos de la línea de producción y aumentando la eficiencia de dicha caldera. Lo cual representa un valioso aporte para la sostenibilidad y competitividad de esta importante empresa alimentaria, en aras de fortalecer el desarrollo científico-tecnológico nacional desde enfoques integrales que potencien la eficiencia energética de procesos industriales estratégicos.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

- Análisis de fuentes documentales.
- Técnicas y métodos empíricos: Observación, encuesta y entrevista.
- Método histórico lógico.
- Método de análisis y síntesis.
- Métodos experimentales: Programación y simulación.

Para dar solución se plantean las siguientes tareas a realizar:

- 1. Realizar una búsqueda bibliográfica actualizada de los diferentes sistemas de control en las calderas pirotubular.
- 2. Analizar el funcionamiento de los diferentes controles en las calderas de vapor.
- 3. Analizar los diferentes métodos de identificación.
- 4. Obtener un modelo matemático que caracterice el comportamiento dinámico de la presión de vapor en la caldera objeto de estudio.
- Diseñar un controlador PID efectivo para la regulación de la presión vapor de la caldera de objeto.

El presente trabajo ha sido organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Fundamentación Teórica: se realiza una caracterización histórica y conceptual de las técnicas de identificación y las calderas de vapor. La caracterización se ha realizado teniendo en cuenta los aspectos históricos y contextuales de la aplicación y desarrollo de los mismos.

Capítulo 2. Se describe el diseño de los experimentos que se realizan en la caldera pirotubular. Se ofrece un análisis de los resultados de la identificación obtenidos y se presenta una valoración económica y medioambiental de la caldera de vapor pirotubular 293R12.

CAPITULO 1. Fundamentación teórica de las calderas de vapor y control de la presión en las calderas de vapor

1.1 Introducción

El vapor de agua es utilizado en un gran número de industrias. Las aplicaciones más comunes son, por ejemplo, esterilización (anteriormente se usaba calderas en los hospitales, las cuales generaban vapor para "esterilizar" los instrumentos médicos), calentamiento de fluidos (como en la industria petrolera, donde se calientan los petróleos pesados para mejorar su fluidez y el vapor es un subproducto muy utilizado), generación de electricidad a través del ciclo *Rankine* (la caldera es parte fundamental de las centrales termoeléctricas), entre otros. El vapor es producido y distribuido en una caldera, que es un dispositivo empleado para calentar agua o generar vapor a una presión muy superior a la atmosférica y a temperaturas mayores a los 100°C [2].

La historia de las calderas de vapor se remonta a los albores de la Revolución Industrial, a finales del siglo XVIII. El invento de la máquina de vapor, atribuido a James Watt, marcó un hito importante en el desarrollo de la industria y la tecnología. Sin embargo, para aprovechar al máximo el poder de la máquina de vapor, se requería una fuente confiable de vapor a alta presión.

Las primeras calderas de vapor eran relativamente simples y se basaban en principios fundamentales. Una caldera básica constaba de un recipiente cerrado donde se calentaba agua para generar vapor. Este vapor a alta presión se utilizaba para impulsar máquinas y locomotoras, revolucionando el transporte y la producción industrial.

Durante el siglo XX, se produjeron grandes avances en la tecnología de las calderas de vapor. Se desarrollaron sistemas de control automáticos y se mejoró la eficiencia energética, lo que permitió un uso más amplio y diversificado de las calderas en diversos sectores industriales, como la generación de energía, la industria petroquímica y la producción de alimentos.

En la actualidad, las calderas de vapor siguen desempeñando un papel crucial en numerosas industrias. Aunque se han desarrollado nuevas tecnologías de generación de energía, las calderas de vapor continúan siendo una opción confiable y eficiente para la producción de energía térmica y el impulso de maquinaria en entornos industriales.

1.2 Generalidades de los generadores de vapor

Un generador de vapor es un equipo o sistema que transforma la energía química contenida en los combustibles, mediante su combustión, en energía térmica disponible, la cual transfiere al agua para producir vapor. Este vapor se utiliza como tal o como sustancia de trabajo en diferentes equipos y/o procesos [3]. Estos utilizan diferentes tipos de combustible para la producción de vapor, entre ellos: diésel, fuel-oil, gas, carbón, biomasa cañera (bagazo), biomasa vegetal, etc.

Los generadores de vapor también son conocidos como calderas y las hay desde pequeñas instalaciones locales para la producción de vapor para cocción de alimentos, planchado en serie de ropa, tratamientos sépticos de instrumentales y labores similares, con vapor de relativa baja temperatura y presión, hasta enormes instalaciones industriales, utilizadas para la alimentación de turbinas de generación de electricidad, y otros procesos industriales donde se requiere vapor en grandes cantidades, a altísimas temperaturas y presiones. La caldera de vapor más elemental es la conocida olla a presión, tan común en nuestros hogares [4].

1.3 Caleras de vapor

En la industria una caldera o generador de vapor es un recipiente metálico, cerrado, dotado de una fuente de calor donde se calienta o se hace hervir el agua (Figura. 1.1). En términos generales, una caldera es un intercambiador de calor que aprovecha el calor que se produce al quemar un combustible, ya se sólido, líquido e incluso gaseoso, donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor de un fluido (principalmente agua), esto se logra mediante

6

la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica. [5]



Figura 1.1: Caldera o generador de vapor

1.3 Partes de una caldera

Aunque la estructura real de una caldera dependerá del tipo, de forma general todas las calderas constan de las siguientes partes (Ver figura 1.2) [6]:



Figura 1.2: Partes principales de una caldera

Quemador: sirve para quemar el combustible y producir la llama.

Hogar o cámara de combustión: alberga el quemador y en su interior se realiza la combustión del combustible utilizado y la generación de los gases calientes. Es donde se alcanzan las temperaturas más altas, próximas a los 2000 °C [7].

Tubos de intercambio de calor: a través de su superficie se efectúa el flujo de calor desde los gases generados en la combustión hasta el fluido caloportador. Suelen incluir elementos (retardadores) o geometrías especiales con el fin de mejorar el coeficiente de transmisión de calor humos-fluido.

Chimenea: es la vía de escape de los humos y gases de combustión hacia el exterior después de haber cedido calor al fluido caloportador. Su trazado es vertical prácticamente en su totalidad y presenta una envoltura aislante y resistente.

Salida de fluido caliente: desde donde el vapor o el fluido caliente se envía hacia los puntos de consumo de la instalación.

Bomba: es el equipo encargado de introducir el fluido frío en estado líquido en la caldera para reemplazar el volumen de fluido caliente que ha abandonado la misma. Para un funcionamiento eficiente, se aconseja que el fluido frío entre en la caldera a una temperatura superior a la del ambiente. En las calderas de vapor y agua sobrecalentada, la temperatura ideal del agua de alimentación debe estar comprendida entre 102 y 105 °C y nunca por debajo de 60 °C. Además, sus características deben respetar los requisitos de la norma UNE-EN 12953-10:2004 [8].

Carcasa: contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio. Debe estar recubierta por una envolvente con material aislante térmico, con el fin de disminuir las pérdidas de calor y proteger a los operarios contra quemaduras [6].

1.4 Clasificación de los tipos de calderas según el contenido de los tubos

Las calderas de vapor se clasifican de diferentes formas, utilizando por lo general sus parámetros y características constructivas o de operación. Estas se clasifican según el contenido de sus tubos en calderas de tubos de agua (acuotubulares) y en calderas de tubos de fuego (pirotubulares).

1.4.1 Calderas de tubos de agua o acuotubulares

Este tipo de calderas de vapor (Ver Figura. 1.3), el agua o la mezcla agua-vapor circula por los tubos, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos y alrededor de ellos circulan los gases de la combustión [9].



Figura 1.3: Caldera de vapor acuotubular

- Ventajas [7]
 - 1) Menor peso por unidad de potencia generada.
 - Por tener pequeño volumen de agua en relación a su capacidad de evaporación, puede ser puesta en marcha rápidamente.
 - 3) Mayor seguridad para altas presiones.
 - 4) Mayor eficiencia.
- Desventajas
 - 1) Su costo es mayor.
 - 2) Deben ser alimentadas con agua de gran pureza, ya que las incrustaciones en el interior de los tubos son, a veces, inaccesibles y pueden provocar roturas de los mismos.
 - 3) Debido al pequeño volumen de agua, le es más difícil ajustarse a las grandes variaciones del consumo de vapor, siendo necesario trabajarlas a mayor presión que la necesaria en las industrias.

1.4.2 Calderas de tubos de fuego o pirotubulares

Son aquellos donde la transferencia de calor se efectúa por el paso de los gases calientes de la combustión a través de tubos sumergidos en agua (Ver Figura 1.4). Dichos tubos normalmente se instalan en la parte inferior de un tambor sencillo o de un casco, debajo del nivel del agua. Además, la presión de trabajo de estos equipos normalmente no excede los 20 kg/ cm^2 , ya que presiones más altas obligaría a espesores de la carcasa demasiado grande. Su máxima producción de vapor es aproximadamente de 25 tn/h, por lo que se utilizan en industrias que presentan demandas de vapor relativamente bajas.



Figura 1.4: Caldera de vapor pirotubular

- Ventajas [7]
 - 1) Menor costo inicial, debido a la simplicidad de diseño.
 - 2) Mayor flexibilidad de operación, ya que el gran volumen de agua permite absorber fácilmente las fluctuaciones en la demanda de vapor.
 - 3) Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, porque las incrustaciones formadas en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y son eliminadas por las purgas.
 - 4) Facilidad de inspección, reparación y limpieza.

• Desventajas

- ✓ Mayor tamaño y peso que las acuotubulares de igual capacidad.
- ✓ Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- Gran peligro en caso de explosión o ruptura, debido al gran volumen de agua almacenado.
- ✓ No son empleadas para altas presiones.

1.5 Controles utilizados en las calderas de vapor

El sistema de control de una caldera es el vehículo a través del cual los balances de masa y de energía de la misma se manejan. Todas las principales entradas de masa y de energía de la caldera deben ser reguladas con el fin de alcanzar las condiciones de salida deseadas. A continuación, se muestra como las partes de todo el sistema de control se coordinan en un sistema de control de caldera (Ver Figura 1.5) [13].



Figura 1.5: Diagrama de bloques de un sistema de control de calderas

Para el requerimiento de energía a la entrada se debe desarrollar una señal de velocidad de combustión. Esta señal crea una demanda de combustible y de aire por separado. La masa de agua en el interior de la caldera también debe ser regulada, y el control de agua de alimentación regula la masa de agua en la caldera. La condición de temperatura final del vapor también debe ser regulada

(para calderas que generan vapor sobrecalentado y tengan esta capacidad de control), y esto se logra a través del sistema de control de temperatura [14]. Los efectos de las acciones de control de entrada interactúan, ya que la velocidad de combustión afecta la temperatura del vapor y la alimentación de agua afecta la presión del vapor, el cual es el parámetro que fija la demanda de velocidad de combustión. El sistema total debe por lo tanto ser aplicado y coordinado de tal forma que se minimicen los efectos de estas interacciones.

1.5.1 Control por la demanda de velocidad de combustión

La demanda o cambio en la demanda de combustible en una caldera se genera por los requerimientos de flujo de energía de los usuarios. Mientras ellos abren válvulas para conseguir más energía de la caldera, la presión cae en el sistema de almacenamiento de energía, dando lugar a la liberación de parte de la energía calorífica almacenada [15].

La magnitud de la caída de presión depende de la relación entre el volumen de agua de la caldera, el volumen total del sistema de vapor, la magnitud de la demanda de vapor, y la magnitud del cambio en la demanda de vapor. Si el volumen de agua es elevado, la energía del agua se libera para reducir el cambio en la presión de vapor. Si el volumen del sistema es relativamente bajo, el cambio en la presión de vapor será relativamente alto y viceversa [16].

La presión de "cabecera" de vapor es el punto de balance de energía entre las demandas energéticas de vapor y la alimentación de combustible y aire a la caldera para reponer la energía al sistema. Cuando existe un requerimiento constante de energía, una presión de cabecera constante indica que el suministro de energía y la demanda están en equilibrio.

Los requerimientos reales son de energía, sin embargo, los sistemas de control trabajan sobre las propiedades físicas de presión y temperatura. El balance energético y de materiales de la caldera puede representarse por los siguientes enunciados [16]:

 \checkmark Demanda de vapor = Flujo de vapor requerido.

- Energía de alimentación = Energía del combustible, aire y agua en la caldera más el cambio en la energía almacenada.
- ✓ Demanda de energía = Vapor para los usuarios.
- ✓ Punto de balance = Presión de cabecera del vapor.
- ✓ Presión en incremento = La alimentación excede la demanda.
- \checkmark Presión en decremento = La demanda excede la alimentación.

1.5.2 Control de relación de la salida con los cambios en la combustión

Los sistemas de combustión, control de alimentación de agua, y control de presión de vapor determinan como la caldera opera en realidad y si logra su eficiencia potencial. Los controles deben diseñarse para regular el combustible, el aire y el agua de la caldera y mantener una presión de vapor deseada mientras se optimiza la eficiencia de la cadera simultáneamente. Durante una operación normal o anormal, la mayor sofisticación de los controles conduce a una mayor eficiencia potencial del sistema total de la caldera. Un sistema de control puede usualmente ser actualizado añadiendo componentes de software o de hardware. Mejorar un sistema de control usualmente es una manera económicamente efectiva de mejorar la eficiencia operativa de cualquier caldera [17].

Generalmente los controles de la caldera pueden clasificarse en dos grupos principales: on/off y modulados [15].

El controlador más simple y menos costoso y aquel usado para controlar la velocidad de combustión sólo en las calderas pirotubulares y acuotubulares más pequeñas es el on/off. El control se inicia con un switch de presión de vapor. Cuando la presión cae por debajo del punto de operación del switch, la bomba de combustible se prende. La combustión continua a velocidad máxima, y la presión o la temperatura se incrementan hasta que el contacto del switch se abre. Aunque este sistema puede mantener la presión de vapor dentro de los límites aceptables, la combustión no se controla debido a que la eficiencia de combustión es producto de un ajuste mecánico del quemador. Cuando el

quemador está prendido, el exceso de aire queda sujeto a las siguientes variaciones en la alimentación de combustible:

- ✓ Presión y temperatura del combustible.
- ✓ Contenido en Btu del combustible (relación hidrógeno/carbón).
- ✓ Gravedad específica del combustible.
- ✓ Viscosidad del combustible.
- ✓ Tolerancias de ajuste mecánico.

1.5.3 Control de la presión de vapor o del flujo de vapor

Asumiendo que el equipo que genera la señal de demanda de combustión es del tipo modulado, muchos métodos y consideraciones diferentes se involucran [16]. Para los sistemas más sencillos, un simple controlador proporcional o proporcional-integral puede ser utilizado. En algunas instalaciones, un flujo constante de vapor puede requerirse para una combinación de una o más calderas, mientras que otras calderas conectadas a la misma cabecera pueden ser usadas para controlar la presión de vapor.

1.6 Sistema de generación de vapor en la UEB "El Dietético"

En la UEB "El Dietético" de Bayamo, la planta de generación de vapor está compuesta actualmente por una caldera pirotubular la cual es el objeto de estudio de este trabajo. Esta caldera tiene una producción de vapor de 12tn/h y trabaja a una presión de operación de 10kgf/ cm^2, el vapor producido se conduce al distribuidor de vapor, para ser utilizado en los procesos del centro.

1.6.1 Sistema de combustible fuel-oil

Es el encargado de la preparación, control y suministro del combustible a las calderas, para garantizar la generación de vapor. Las calderas del centro utilizan para su funcionamiento el fuel-oil como fluido principal y el gas-oil (diésel) como fluido auxiliar. El área de almacenamiento de combustible posee dos tanques para el almacenamiento de fuel-oil con calentador de flujo saliente de 63 000

litros de capacidad cada uno. Además, cuenta con un tanque de diario de fueloil con calentador de flujo saliente de 3500 litros de capacidad y otro tanque para gas-oil (diésel) de 5 000 litros de capacidad (Ver figura 1.6).



Figura 1.6: Diagrama tecnológico del sistema de abastecimiento de combustible

Luego, el combustible sale del tanque de diario con una temperatura aproximada de 40°C y llega al cabezal de succión de las bombas recirculadoras o de trasiego de combustible a las calderas. Una de estas bombas está en trabajo constante y la otra en reserva para efectuar los cambios según el programa de mantenimiento. El combustible fuel-oil pasa a los dos calentadores de vapor-fuel de 15 000 kcal/h cada uno para incrementar la temperatura del fluido hasta 70 u 80°C. La temperatura del combustible se controla mediante una válvula termostática, cuyo sensor está colocado en la tubería de salida del combustible a las calderas (Ver figura 1.7).



Figura 1.7: Diagrama tecnológico del sistema de preparación de combustible

La toma de entrada al quemador está provista de una combinación de válvulas de globo y un filtro. El combustible que no es consumido por el quemador pasa por el desgasificador (equipo que remueve O2 del agua de alimentación a calderas ya que el oxígeno es altamente corrosivo en los circuitos de vapor), para entregarlo libre de los gases producidos durante el calentamiento final que recibe en el quemador a la línea de retorno que conduce dicho combustible hacia el tanque para uso diario. En esta línea está instalado un termómetro. Las interconexiones de la toma de entrada y retorno de combustible a la bomba del quemador se realizan mediante mangueras flexibles.

La bomba del quemador o del lazo de alta presión, recibe el combustible con una presión regulada entre 0.5 y 2 bar. El combustible se calienta entre 50-70°C. La presión de alimentación del combustible a la bomba del quemador tiene el mismo valor cuando el quemador está apagado y cuando trabaja con el caudal máximo de combustible que requiere la caldera.

En cuanto al quemador de la caldera objeto de estudio, esta posee dos resistencias eléctricas de precalentamiento de 12 KW cada una. Su función principal es elevar aún más la temperatura del combustible antes de producirse la combustión en el hogar (Ver figura 1.8).

16



Figura 1.8: Diagrama tecnológico de alimentación de combustible al quemador

1.7 Sistema de generación de vapor en la caldera pirotubular 293R12 de la empresa de productos lácteos UEB 'El Dietético'' de Bayamo.

La planta de generación de vapor de la UEB "El Dietético" en Bayamo actualmente opera con un control ON/OFF a través de un controlador lógicosecuencial que mantiene las variables dentro de rangos permitidos.

Este sistema ha cumplido con los requerimientos de la industria cubana hasta el momento. Sin embargo, los controladores ON/OFF generan ineficiencias derivadas del alto consumo durante el encendido y apagado frecuente del quemador [18].

La caldera pirotubular que constituye el objeto de estudio genera 12 toneladas de vapor por hora a una presión de 10 kgf/cm2. El vapor producido se conduce a los procesos del centro a través de un distribuidor.

Se plantea mejorar el control implementando un controlador PID, el cual permite un funcionamiento más eficiente disminuyendo los picos de consumo. Este tipo de control avanzado representa una oportunidad de costo-beneficio acorde al contexto económico industrial cubano. El objetivo proponer un control PID que opere de manera más eficiente la caldera y represente una solución viable y económicamente para la UEB.

1.8 Levantamiento instrumental de la caldera objeto de estudio

1.8.1 Caldera pirotubular 293R12

Descripción:

La caldera de vapor tipo pirotubular, horizontal de tres pasos, uno de llama y dos de humos con cámara húmeda totalmente refrigeradas por agua. La combustión se desarrolla en el hogar diseñado para permitir una perfecta combustión del quemador, una temperatura adecuada y una carga térmica dentro de los limites (Ver figura 1.9). La circulación de los gases se realiza con una sobrepresión en el hogar y por el diseño de la caldera los gases circulan uniformemente por los tubos y a la misma velocidad, permitiendo una cesión constante del calor [19].



Figura 1.9: Caldera pirotubular 293R12

Datos técnicos:

- ✓ Producción de vapor: 12000kg/h.
- ✓ Potencia calorífica: 7835kW.
- ✓ Clase de vapor: Saturado seco.
- ✓ Presión de servicio: 12bar.
- ✓ Presión de diseño: 20bar.
- ✓ Temperatura de diseño: 195°C.

- ✓ Volumen de agua: 17,7 m^3 .
- ✓ Temperatura de alimentación: 80°C.

En cuanto a diseñó:

- ✓ Longitud total cuerpo de caldera sin aislamiento: 6m.
- ✓ Alto desde la base: 3,26m.
- ✓ Diámetro del cuerpo a presión: 2,75m.

1.8.2 Válvulas termostáticas autoaccionadas

Las válvulas termostáticas auto-accionadas pertenecientes al fabricante Spirax-Sarco (Ver figura 1.10) son utilizadas para el control de la temperatura de una amplia gama de fluidos industriales y su rango de temperatura es de -20°C a +140°C. Presentan una acción de control proporcional con alta rangeabilidad, no requieren alimentación externa y tienen varias longitudes de capilar y diferentes combinaciones para poder adaptarse a una amplia gama de aplicaciones. Actualmente hay instaladas dos de este tipo, una para regular la temperatura del combustible a la salida del intercambiador de calor [19].



Figura 1.10: Válvulas termostáticas autoaccionadas.

Datos técnicos:

- ✓ Tamaño: Bridas DN15 a DN100, Roscadas 1/2" a 3".
- ✓ Tipos: 2 vías y 3 vías, globo.
- ✓ Conexiones: Roscadas BSP y NPT, Bridas PN16, PN25, ANSI150 y ANSI300.
- ✓ Temperatura máxima: 232°C.
- ✓ Condiciones de cuerpo: Bronce.

1.8.3 Bombas de agua CR16-100

Las bombas de agua, son del tipo CR16-100 del fabricante Grundfos (Ver figura 1.11). Son bombas centrífugas verticales multietapa con puertos de aspiración y descarga al mismo nivel para hacer posible su instalación en sistemas mono-tubos horizontales. El cabezal de la bomba y la base están fabricados en fundición; todas las demás piezas destinadas al contacto con el líquido están fabricadas 33 de acero inoxidable. Además, un cierre mecánico de cartucho garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. Poseen un rango de temperaturas para el líquido de entre -20 a 120°C, soporta líquidos con densidades de hasta 998.2 kg/ m^3 , y su velocidad de rotación puede llegar hasta 3520 rpm.



Figura 1.11: Bomba de agua CR16-100

1.8.4 Presostato Tipo KP5-37

Descripción:

El presostato KP5-37 de Danfoss se usa para proporcionar protección a sistemas de refrigeración y aire acondicionado frente a presiones de aspiración o descarga excesivamente bajas o altas, respectivamente (Ver figura 1.12). Los presostatos KP se pueden conectar directamente a un motor AC monofásico de, aproximadamente, 2 kW de potencia máxima, o instalar en el circuito de control de un motor DC o un motor AC de mayor potencia. Todos ellos están equipados con un interruptor SPDT cuya posición se determina a partir del ajuste del presostato y la presión en el conector. Los presostatos KP están disponibles con protección IP30, IP40 e IP50.



Figura 1.12: Presostato KP5-37

1.8.5 Quemador GI 420 DSPN-D

Descripción:

El quemador de aceite de combustible de dos etapas progresivas/modulantes, modelo GI 420 DSPN-D del fabricante Baltur es el que utiliza la caldera objeto de estudio (Ver figura 1.13). Trabaja en dos etapas progresivas, por lo que tiene tres estados en su funcionamiento: apagado, flama baja (primera etapa), flama alta (segunda etapa). Comienza su funcionamiento en flama alta cuando hay demanda de calor en el sistema. Cuando la variable se acerca al valor de referencia el control envía una señal al quemador y este cambia a flama baja para que la magnitud de la variable aumente en menor proporción, aunque sigue inyectando calor al sistema. Si la variable aumenta su magnitud hasta un punto máximo, se envía una señal al quemador y este se apaga. Si en flama baja la variable empieza a disminuir su magnitud hasta un punto mínimo porque el gasto de calor en el sistema es mayor que el suministrado, el control le envía una señal al quemador y este aumenta alta.



Figura 1.13: Quemador modelo GI 420 DSPN-D

1.8.6 Control del quemador

LAL1.25BT de fabricante Siemens (Ver figura 1.14), es un controlador para quemadores de combustibles líquidos sin la supervisión de presión de aire para control de la compuerta. Este dispositivo sirve para la supervisión de quemadores de atomización de combustibles líquidos, para quemadores de media-alta capacidad y posee un funcionamiento intermitente (al menos un apagado controlado cada 24h). Además, pueden ser utilizados en múltiples etapas o modulares y son adecuados para usarlos con calentadores estacionarios de aire. Está hecho de plástico negro a prueba de impactos y es resistente al calor. Su alimentación es de AC 230V y 50Hz, posee plug-in de diseño, lámpara de advertencia de bloqueo, detectores de llama QRB y QRC1 y su rango de temperatura está entre -20 a +60°C.



Figura 1.14: Controlador del quemador LFL 1.333

1.8.6 Disco con tornillos que regula el caudal del combustible

La variación del caudal de combustible en la caldera está determinada por un disco con perfil variable que, al girar, comprime más el muelle del regulador de la presión de retorno y, por tanto, un aumento de la presión de vapor, corresponde a un aumento del caudal de combustible. Al aumentar el caudal de combustible, aumentar el caudal de aire, debido a que ambos elementos son fundamentales para determinar el tamaño de la llama que genera el vapor de agua necesario (Ver figura 1.15).



Figura 1.15: Disco con tornillos que regula el caudal del combustible

1.9 Aspectos generales sobre la identificación de sistemas

Cuando se desea controlar un determinado proceso se necesita un modelo matemático que describa adecuadamente su comportamiento dinámico [20]. Para la modelación matemática de los procesos que se originan en el interior de las calderas existen dos métodos fundamentales. El primero está basado en el modelado a partir de las ecuaciones de balance de masa y energía. Sin embargo, este método es muy engorroso y difícil por el gran número de variables y ecuaciones involucradas en el funcionamiento de las calderas [21].

Otro método consiste en la obtención de forma experimental de un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio a partir de las variables observadas (medidas) de dicho proceso (señal de salida o variable controlada y(t), señal de entrada o variable de control u(t), y en algunos casos las perturbaciones v(t)). Este último método se conoce como identificación de sistemas [22]. Este procedimiento ha sido utilizado de forma exitosa en la obtención de modelos matemáticos de la presión del vapor en calderas pirotubulares [23].

1.9.1 Métodos de obtención de un modelo

Existen dos métodos principales para obtener el modelo de un sistema:

Modelado teórico: Se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso. No es más que un enfoque analítico fundamentado en leyes físicas

(leyes de Newton, enfoque de Hamilton o de Euler-LaGrange) o ecuaciones de balance, empleadas para describir el comportamiento del proceso. Este método conduce generalmente a modelos complejos y no lineales que deben ser sometidos a un proceso de simplificación y linealización. El inconveniente principal de este enfoque consiste en que se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, no siempre disponible.

Identificación de sistemas: Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio. Entre los principales métodos de identificación se tiene [24]:

- Identificación experimental mediante señales especiales: Este enfoque resulta generalmente el más directo y el que puede producir resultados a más corto plazo. Las señales utilizadas con mayor frecuencia son los escalones y las llamadas secuencias binarias seudo-aleatorias. La restricción más importante de esta solución es la necesidad de introducir perturbaciones indeseables en el proceso. En condiciones ideales, el experimento de identificación deberá hacerse contando con una computadora conectada en línea con el proceso, pero en la práctica, en muchas ocasiones es necesario basarse en observaciones periódicas de las variables y el procesamiento fuera de línea de los datos.
- Identificación recursiva: Se basa generalmente en una u otra modificación del método de los mínimos cuadrados. Se asume una estructura fija del modelo la que por lo general es una ecuación de diferencias lineales. Lo característico de este enfoque es que se parte de una estimación inicial, generalmente arbitraria, de los parámetros del modelo que se van actualizando y mejorando con cada nueva información obtenida. Este tipo de identificación está concebida para usarse dentro de un esquema de control adaptable, aunque se ha utilizado con el objetivo de obtener modelos para estudios de simulación. Como los datos que se usan tienen generalmente la forma de secuencias discretas de mediciones de las variables del proceso, los modelos que se identifican son también de naturaleza discreta.

1.10 Identificación de sistemas utilizando el software MATLAB

El software profesional MATLAB posee un toolbox para la Identificación de sistemas el cual constituye una poderosa herramienta para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, a partir de un conjunto de datos de entrada/salida. La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica (*Ident*) la cual facilita construir los modelos. Otra forma es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión ".*m*", utilizando los comandos de este toolbox. Esta herramienta posee la ventaja de proveer varios métodos y estructuras para obtener un modelo que se aproxime al sistema real. Además de la estimación de los modelos, nos permite analizar y validar los modelos utilizando respuestas frecuenciales y temporales y la ubicación de los polos y ceros, y además dispone del análisis de los residuos.

Conclusiones parciales

- Se analizaron los principales conceptos, características, así como el principio de funcionamiento las calderas de vapor.
- Se mencionaron las diferentes clasificaciones de las calderas en dependencia de sus características.
- Se explicaron los tres subsistemas principales del proceso de generación de vapor en las calderas pirotubulares para facilitar su control. Se mostraron los diagramas funcionales y las principales variables a controlar para cada uno de ellos.
- Se comentaron algunos de los métodos de control utilizados en las calderas pirotubulares.
- Se explicó el funcionamiento del sistema de generación de vapor de la empresa de productos lácteos UEB "El Dietético", así como de la caldera objeto de estudio, a la cual se le realizó el levantamiento instrumental actual.

 Se describieron en breve síntesis las técnicas y métodos de identificación, siendo la identificación experimental la utilizada.

Capítulo 2. Identificación experimental y resultados del comportamiento dinámico de la presión de vapor

La presión de vapor es una variable crítica en una caldera pirotubular, pues determina la eficiencia del proceso de combustión.

Modelar matemáticamente esta dinámica compleja considerando los detalles termodinámicos y fisicoquímicos al interior de la caldera requeriría evaluar aspectos como la energía química del combustible, las relaciones durante la combustión, los coeficientes de transferencia térmica, entre otros parámetros que variarían para cada instalación en particular.

Este enfoque "interno" permite comprender profundamente las interacciones entre las distintas variables. Sin embargo, dadas las limitaciones del caso práctico donde el objetivo principal es controlar la presión, se justifica utilizar un modelo matemático más simple de tipo causa-efecto.

Esto es, focalizarse únicamente en las variables de entrada (combustible) y salida deseada (presión), dejando de lado los complejos mecanismos internos. Bajo el supuesto de que el sistema se comporta como lineal, invariante y estable en el tiempo, el modelo a obtener puede expresarse mediante una función de transferencia, lo cual facilita su identificación a partir de datos experimentales y su aplicación posterior en el diseño de control [25].

Para lograr este objetivo, se utilizarán los procedimientos estadísticos de Identificación de Sistemas. Este es un campo del modelamiento matemático de sistemas dinámicos que utiliza datos experimentales como punto de partida, a los cuales se aplican un conjunto de técnicas estadísticas con el fin de ajustar los datos a una estructura dinámica determinada por el investigador. En este caso, no hay necesidad de conocer las leyes internas que gobiernan el comportamiento del sistema. Por tanto, los modelos obtenidos por estas técnicas se denominan de "caja negra" [22]. En la figura 2.1, puede observarse el esquema genérico para el proceso de identificación.



Figura 2.1: Esquema general de identificación

El proceso de obtener un modelo a partir de los datos de entrada y de salida del proceso sigue los siguientes pasos [22]:

- Seleccionar las variables de entrada (variable manipulada) y de salida (variable controlada).
- Seleccionar un conjunto de datos experimentales de entrada y de salida realizando los ensayos al proceso.
- 3. Examinar y pulir los datos (filtrar los datos).
- 4. Seleccionar la estructura del modelo y elegir un algoritmo particular para determinar sus parámetros.

2.1 Planificación experimental y selección de las variables de entrada y salida

Cuando se investiga un proceso del que se tiene un conocimiento previo pobre, lo razonable es comenzar con un análisis transitorio o de respuesta en frecuencia para lograr una estimación grosera de la dinámica y de las perturbaciones. De esta manera se pueden utilizar los resultados para planificar posteriores experimentos [20].

En este caso, el sistema de control de la caldera utiliza un enfoque de dos etapas consecutivas para regular la presión. La medición de la presión se realiza mediante un dispositivo llamado presostato TK5-37. Cuando la presión alcanza un nivel específico, este presostato interrumpe la alimentación eléctrica del quemador, evitando así un aumento excesivo de la presión.

Además, el flujo de combustible se controla mediante un disco con un perfil que puede variar. Al girar este disco, se comprime un resorte que regula la presión. Por lo tanto, un incremento en la presión resulta en un mayor flujo de combustible, mientras que una disminución en la presión provoca una reducción en el flujo.

Cuando se quiere obtener un modelo matemático de un proceso, en el cual solo interviene una variable a manipular y una a controlar (SISO), el primer paso a realizar es en definir la variable manipulada o de control, la variable controlada, y las posibles perturbaciones. En este caso:

- Variable manipulada (VM): apertura del disco con tornillos del quemador que regula el caudal de combustible.
- ✓ Variable controlada (VC): presión de vapor.

Luego de conocer las variables del sistema, es necesario observar el comportamiento del mismo ante variaciones considerables de la señal manipulada, para esto se abre el lazo de control presión de vapor de la caldera, con lo cual queda fuera el controlador y se aplica entonces un paso escalón a la apertura del disco con tornillos del quemador entre un valor inicial y uno final.

En este caso, los valores elegidos fueron de 0 a 5.9%, es decir, se decidió realizar un porciento de apertura relativamente pequeño para no afectar las condiciones de trabajo normal de la caldera y para evitar posibles accidentes (considerando que el generador de vapor posee sus propios sistemas de seguridad).

Esta señal de excitación fue aplicada al sistema hasta que la salida del mismo se estabilizó, es decir, que dejó de responder ante el estímulo impuesto. Las muestras de entrada y salida fueron tomadas con un período de 1s, debido a que la presión de vapor a la salida de la caldera presenta una respuesta bastante rápida y para que no se pierda información fundamental en la dinámica del sistema (Ver figura 2.2).



Figura 2.2: Prueba paso escalón para una entrada entre 0%-5.9%

2.3 Análisis de ruido

Otro aspecto importante a tener en cuenta, es la presencia o no de ruido en las mediciones realizadas. Para ello se realiza un análisis en la entrada y la salida del sistema en el dominio de la frecuencia, a través de la Transformada Rápida de Fourier (TRF).

En la siguiente figura, se puede observar que el ruido existente en las señales de entrada y salida se encuentra en la zona de baja frecuencia y es prácticamente nulo. Partiendo de estos resultados, se deduce que no es necesaria la utilización de filtros (Ver figura 2.3).



Figura 2.3: Grafico de señal de entrada y salida en el dominio de la frecuencia utilizando TRF

2.4 Estimación del modelo matemático

Para la obtención del modelo que representa el comportamiento del proceso de presión de vapor se empleó la herramienta de identificación de sistemas de Matlab® (*System Identification Tool*), la cual tiene como objetivo la construcción de modelos de sistemas complejos, a partir de conjuntos de datos con ruido e imperfecciones. La herramienta provee los elementos necesarios para la creación de modelos de sistemas dinámicos, basándose en la observación de señales de entrada y salida. Presenta una interfaz gráfica flexible, que ayuda en la organización de los datos y modelos. El trabajo con la herramienta de identificación fue el siguiente:

- Importar datos de entrada-salida en el dominio del tiempo y selección de tiempo de muestreo.
- ✓ Seleccionar datos para la identificación y la validación.
- ✓ Determinar la estructura adecuada y sus parámetros.

Para la estimación del modelo, se utilizó la funcionalidad de modelado de procesos, que permite obtener una función de transferencia como fracción de polinomios (de hasta grado 3). En esta ventana se deben especificar el número de polos, se pueden indicar o no el mismo número de ceros y la existencia de retardo, el cual es común en este tipo de procesos (en la fig. 2.2 se puede observar que la presión de vapor demora en reaccionar al paso escalón aplicado).

Además, se pueden especificar parámetros ya conocidos de la función de trasferencia al marcar la casilla de *known*, definir limites en *Bounds* y añadir datos iniciales en *Initial Guess* (o mantenerlos en automáticos). Al hacer click en *estimate* la herramienta comienza a iterar y eventualmente, el modelo obtenido aparecerá en el cuadro de vistas de modelo (*models view*) (Ver figura 2.4).

Transfer Function	Par Known	Value	Initial Guess	Bounds
	К	1.668	Auto	[-Inf Inf]
K exp(-Td s)	Tp1	78.6044	Auto	[0 210992.3
(1 + Tp1 s)(1 + Tp2 s)	Tp2	99.6455	Auto	[0 230790.2
	ТрЗ 🗌	0	0	[0 Inf]
Poles	Tz 🗌	0	0	[-Inf Inf]
2 V All real V	Td 🗌	30	Auto	[0 30]
☐ Zero	Initial Guess	cted		
Integrator	O From exis	ting model: ned	Value>In	itial Guess

Figura 2.4: Ventana de modelado de proceso de la herramienta de identificación de sistemas

En este caso, se realizaron pruebas con diferentes tipos de modelos, teniendo en cuenta el conocimiento previo de que el proceso de la presión de vapor en calderas presenta retardo de tiempo, de ahí que se hicieran pruebas con modelos de primer orden con retardo (ecuación 2.1), segundo orden con retardo (ecuación 2.2) y tercer orden con retardo (ecuación 2.3). Los resultados fueron los siguientes:

$$G(s) = \frac{1.7 \cdot e^{-30s}}{(207.2s+1)} \tag{2.1}$$

La respuesta al paso escalón obtenida de este modelo puede observarse en la figura 2.5:





> Modelo de segundo orden con retardo:

$$G(s) = \frac{1.63 * e^{-30s}}{(78.6s+1)(99s+1)}$$
(2.2)



Su respuesta al paso escalón se puede observar en la figura 2.6:

Figura 2.6: Respuesta transitoria al paso escalón para el modelo de 2do orden

> Modelo de tercer orden con retardo:

$$G3(s) = \frac{1.668 \cdot e^{-30}}{(59.1 \, \text{s}+1)(59.142 \, \text{s}+1)(59.143 \, \text{s}+1)}$$
(2.3)

Su respuesta al paso escalón se puede observar en la figura 2.7:



Figura 2.7: Respuesta transitoria al paso escalón del modelo obtenido de 3er orden

2.6 Validación y selección del modelo matemático

La validación de modelos es uno de los pasos esenciales en la identificación. Luego que la fase de estimación de parámetros ha sido realizada, se debe validar el modelo obtenido. Validación significa evaluar el grado de confianza de nuestro modelo, el cual no está exento de imprecisiones. La aceptación del modelo no sólo depende de este en sí, sino del propósito de su uso.

En lugar de una prueba simple, validar el modelo involucra analizar su respuesta bajo diferentes puntos de vista. Es este grupo de pruebas, y la coherencia de los resultados obtenidos nos permite aceptar el modelo. Existen varias formas de probar un modelo:

- ✓ Validación cruzada.
- ✓ Prueba del error final de predicción y análisis de polos y ceros.
- ✓ Medidas estadísticas.

Para realizar la validación de los modelos obtenidos en el apéndice anterior, será utilizada una vez más la herramienta de identificación de sistemas (*System Identification Toolbox*) de Matlab®. Para este caso, se realiza la validación cruzada del sistema original y los modelos propuestos. Este tipo de validación de modelos consiste en comparar gráficamente en el dominio del tiempo la respuesta del modelo y la respuesta del sistema real. De este modo se puede estudiar la independencia de los resultados del conjunto de los experimentos (Ver figura 2.8).



Figura 2.8: Salida de los modelos estimados

A su vez, la validación cruzada se considera la mejor manera de validar el modelo y la única prueba verdadera para su aplicabilidad general. En la figura 2.8, se puede observar la comparación de los tres modelos obtenidos con la señal real en el dominio del tiempo.

Modelo	Performance (%)
Primer Orden con retardo	77.10
Segundo Orden con retardo	86.41
Tercer Orden con retardo	91.82

Tabla 2.1: Índices de performance para los modelos del lazo de la presión

Gracias a estos valores, es posible afirmar que el modelo que mejor describe el comportamiento de la presión de vapor en la caldera pirotubular estudiada es el de tercer orden, por ello será elegido para representar el lazo de presión. De esta manera podría darse por concluido el proceso de validación, no obstante, es necesario examinar el modelo seleccionado con vista a conocer la calidad del mismo. A continuación, se analizarán algunas características fundamentales tales como los polos y ceros de la función de transferencia.

2.6.1 Análisis de polo y ceros del modelo seleccionado

Polos y ceros consisten en un método que permite evaluar los polos y ceros de las expresiones racionales para hallar el conjunto solución en desigualdades. Los ceros son las expresiones polinómicas que conforman el numerador de la función y los polos las expresiones polinómicas que conforman el denominador cuando este tiende a cero. En este caso, se pueden determinar los ceros y polos de la función de transferencia del modelo seleccionado (en este caso el de 3er orden) utilizando los comandos *pole* y *zero* del asistente matemático Matlab®, donde se obtienen tres polos en el punto - 0.0169(dentro del circulo unitario) y no existen ceros (Ver figura 2.9).



Figura 2.9: Gráfica de polo y ceros del modelo seleccionado

Del estudio de polos y ceros de la función de transferencia del modelo de tercer orden obtenido se puede observar el hecho de que los polos ubicados en el lado izquierdo del plano complejo, producen respuestas naturales en forma de exponenciales decrecientes puras o sinusoides amortiguadas. Estas respuestas tienden a cero a medida que el tiempo tiende a infinito. Los polos observados en la figura anterior poseen una parte real negativa y por tanto producen estabilidad en el sistema.

2.7 Diseño de un controlador para la presión en la caldera objeto de estudio

Sintonizar un controlador es seleccionar los mejores valores de los parámetros ajustables del controlador retroalimentado. El procedimiento de sintonización de un sistema de control está centrado en el modelo del proceso [26].

Luego de haber obtenido dicho modelo, el esquema de control básico que se propone para el control es mostrado (Ver figura 2.10). Este esquema corresponde al control más elemental que se puede implementar para controlar la presión de vapor de la caldera propuesta



Figura 2.10: Diagrama de control de la presión de vapor en la caldera objeto de estudio

2.8 Ajustes del controlador

Para encontrar la mejor sintonía de los controladores en lazo cerrado, se utilizó la interfaz gráfica PID Tuner, mediante el comando pidTuner desde la ventana *Command Windows* del MATLAB. En el cual se seleccionaron diferentes tipos de configuraciones de los controladores y se adaptaron al lazo de control de la presión de vapor en la caldera pirotubular.

A continuación, se puede observar una gráfica que presenta las respuestas temporales de las dos acciones de control diseñadas (Ver figura 2.11).



Figura 2.11: Comparación grafica de los controladores diseñados

Para una mejor comparación, en la tabla 2.2 se encuentran algunas de las especificaciones temporales presentes en estas respuestas.

Lazo de control	Tiempo de asentamiento	Tiempo de sobrepaso	Máximo Sobrepaso(<i>Mp</i>)	Estabilidad
PI	320.11s	140s	6.51 %	estable
PID	209.48s	89.113s	6.05%	estable

 Tabla 2.2: Constantes de tiempo halladas por el pidTuner

De la tabla 2.2 puede observarse que la estrategia de control PID presenta menor tiempo de sobrepaso y de asentamiento que la acción de control PI, lo que indica que su velocidad de reacción es más rápida y, por ende, la inercia produce un pico por encima del valor deseado. A pesar de esto último, el máximo sobrepaso del lazo de control con PID es ligeramente menor, lo que se traduce como menos oscilaciones y por ende una mayor velocidad de estabilización, aunque en este aspecto la diferencias entre los valores de Mp son casi despreciables y los picos máximos no son pronunciados. Por tanto, se puede apreciar que la acción de control PID presenta el menor tiempo de estabilización y, por tanto, es el que alcanza el valor deseado más rápido.

Los parámetros obtenidos por en el pidTuner para el control PID diseñado fueron: Kp =3.09

Ti =104.34

Td =26.093

La ecuación del controlador PID quedaría:

 $Gc(s) = 3.09 \left[1 + \frac{1}{104.34s} + 26.093s \right]$ (2.8)

Por tanto, se ha diseñado un controlador PID (proporcional-integral-derivativo), cuyos parámetros son: Kp=3.09; Ti=104.34; Td=26.093. Se comprobó que la respuesta ante un escalón unitario en el lazo cerrado con dicho controlador satisface los requerimientos de tiempo de asentamiento de 209.48s y un máximo sobrepaso de 6.05%.

2.9 Valoración económica y medioambiental

La identificación y diseño de un control de la presión de vapor en la caldera pirotubular 293R12 de la empresa láctea UEB "El Dietético" en Bayamo, y su vinculación con el modelo matemático obtenido de la presión de vapor de dicha caldera, tiene implicaciones económicas y medioambientales significativas.

En términos económicos, el diseño de estrategias de control basadas en el modelo matemático de la presión de vapor de la caldera puede conducir a una mayor eficiencia en la utilización de combustibles fósiles. Al optimizar la operación de la caldera y garantizar una óptima utilización de los combustibles, se pueden lograr ahorros significativos en los costos de energía para la empresa. Esto puede aumentar la rentabilidad y la competitividad de la UEB "El Dietético" al reducir los gastos operativos asociados con la caldera y mejorar la eficiencia en la producción de productos lácteos.

Desde una perspectiva medioambiental, la optimización del control de la presión de vapor en la caldera contribuye a la protección del medio ambiente al reducir el consumo de combustibles fósiles. Al utilizar los combustibles de manera más eficiente, se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y se contribuye a mitigar el cambio climático. Esto es especialmente relevante en la industria láctea, donde la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero puede ayudar a cumplir con los objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.

Además, al ampliar los conocimientos científicos-técnicos del personal interesado en esta tecnología, se fomenta la capacitación y el desarrollo profesional. Esto puede tener beneficios a largo plazo para la empresa y el sector en su conjunto, ya que el personal capacitado estará mejor preparado para implementar tecnologías más eficientes y sostenibles en el futuro. También puede abrir oportunidades para la transferencia de conocimientos y mejores prácticas a otras empresas del sector lácteo, promoviendo el progreso y la innovación en la industria.

39

Conclusiones Parciales

- Se realizaron los experimentos para la identificación, se realizó el procesamiento de los datos obtenidos con la ayuda del Toolboox de identificación del MATLAB y se obtuvieron los modelos matemáticos para la presión de vapor frente a los cambios de la posición del disco de regula el flujo del combustible.
- Se realizó la validación de los mismos mostrando un grado de aproximación aceptable entre el proceso y el modelo obtenido. Obteniendo un modelo matemático de tercer orden con un 91.82% de performance, el cual es el que mejor describe el comportamiento de la presión de vapor en la caldera pirotubular estudiada
- Se realizó también una valoración económica y medioambiental sobre el trabajo realizado.

CONCLUSIONES GENERALES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación y la importancia que esta reviste para los futuros sistemas de control de la presión de vapor, arribamos a las siguientes conclusiones:

- A partir de datos obtenidos experimentalmente se obtuvo un modelo matemático aproximado del comportamiento dinámico del proceso de presión de vapor en el interior del generador de vapor objeto de estudio.
- Se realizó la validación de los mismos mostrando un grado de aproximación aceptable entre el proceso y el modelo obtenido. Obteniendo un modelo matemático de tercer orden con un 91.82% de performance, el cual es el que mejor describe el comportamiento de la presión de vapor en la caldera pirotubular estudiada
- Con este modelo se puede estudiar la dinámica del proceso en cuestión para el diseño de diversas estrategias de control que permitan mejorar la eficiencia del mismo.
- Basándose en los modelos obtenidos, se diseñó una estrategia de control PI y otro PID. Obteniendo como resultado que la estrategia de control PID presenta menor tiempo de sobrepaso y de asentamiento que la acción de control PI, lo que indica que su velocidad de reacción es más rápida y, por ende, la inercia produce un pico por encima del valor deseado. A pesar de esto último, el máximo sobrepaso del lazo de control con PID es ligeramente menor, lo que se traduce como menos oscilaciones y por ende una mayor velocidad de estabilización, aunque en este aspecto la diferencias entre los valores de Mp son casi despreciables y los picos máximos no son pronunciados. Por tanto, se puede apreciar que la acción de control PID presenta el menor tiempo de estabilización y, por tanto, es el que alcanza el valor deseado más rápido.

RECOMENDACIONES

- Que el presente trabajo se utilice de base de estudio y aplicación en la caldera de tubos de fuego.
- Valorar la posibilidad de la implementación del sistema propuesto para un control más efectivo del sistema de generación de vapor. Esto permitirá ampliar la posibilidad de mejoras en la cadena de producción de la entidad, la cual se abastece del vapor proveniente de la caldera estudiada.

Bibliografía

- J. A. Kent, Kent and Riegel's handbook of industrial chemistry and biotechnology (Vol. 2)., 2016.
- S. (. industriales), «¿Para qué se utilizan las calderas de vapor?,» 2020. [En línea]. Available: http://www.sincal.es/que-son-las-calderas-de-vapor. [Último acceso: 31 octubre 2023].
- [3] B. C. Rivas-Pérez R, *Generadores vapor de bagazo y su control*, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tegnología para el Desarrollo (CYTED), 2011.
- [4] L. O.F, Tesis de Diploma. Remodelación del sistema automático del generador de vapor puro de la Planta de Producción del CIGB, La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Hecheverría, Departamento de Automática y Computación.
- [5] G. Rodriguez, Operación de calderas industriales.
- [6] G. Fenosa., *Guía de Calderas: todo lo que necesitas saber sobre el ahorro energético. Manual para empresas.,* 2020.
- [7] B. M. Adolfo, Capacitación Operadores de Calderas y Generadores de Vapor, 2021.
- [8] N. E. U.-E. 12953-10, Por la que se establecen los requisitos para la calidad del agua de alimentación y del agua de las calderas pirotubulares., 2004.
- [9] R. C. V. C. Rivas-Pérez R, «Control system of firetube boilers,» de In international Conference of Science and Technology for Development, CIMAF'97, La Habana, Cuba, 1997.
- [10] F. d. l. E. d. l. C. d. Madrid., Guía Básica de Calderas Industriales eficientes., Madrid., 2021.
- [11] Zetec, «Clasificasión de Calderas,» de *In Conferencia sobre generadores de vapor*, Montevideo, 2018.
- [12] A. A.P, Monotorización de las salas de la empresa de cárnicos Bravos S.A, La Habana: Trabajo de Diplomas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echavarría, Departamento de Automática y Computación, 2016.
- [13] R.-P. R. Milan-García G, «Automatización integral de los generadores de vapor igneotubulares,» de En Memoria del Segundo Congreso de la Asocioción Colombiana de Automática, Bucaramanga, Colombia, 1997.

- [14] Santiago Gómez Santamaría, Sistemas de Control en Calderas, SPIRAX-SARCO, 2019.
- [15] G. G.F, Boiler Control System Engineering, ISA Instrumentation, Systems and Automation Society, 2005.
- [16] D. S.G, The Control of Boilers, USA: ISA Research Triangle Park.
- [17] L. D.M, Boiler Control System, London: Mc-Graw Hill.
- [18] AINAIR, Manual de Instrucciones de funcionamiento: Caldera de vapor pirotubular 293R12, SPIRAX SARCO.
- [19] R.-P. R. S.-M. J. Rodriguez-Vázquez J.R, System Identification of steam-pressure variation process inside a firetube boiler, 2007.
- [20] J. H. O. L. L. C. R Rivas-Pérez, Modelado matemático dinámico de generadores de vapor., Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 1994.
- [21] I. Ljung, System Identification, New Jersey: Pretince Hall, 1999.
- [22] J. R.-. Vázquez, «Identificación del proceso de varición de la presion de vapor en el cuerpo de una caldera de tubos de fuego,» de En Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Control Automático, Salvador-Bahía, Brasil, 2006.
- [23] A. A, Temas de indentificación y control adaptable, La Habana, 2000.
- [24] O. K, Modern Control Engineering. 5 Edition, New Jersey: Prentice Hall., 2010.
- [25] O. J. R. e. c. realimentados, Tesis Doctoral, México: Departamento de Ingeniería Química, 2005.
- [26] H. G. Balnco, Instrumentación y Control de procesos industriales., Alfaomega.
- [27] «Calderas de vapor,» Calderas Continental Ltda, 2021. [En línea]. Available: https://www.calderascontinental.com. [Último acceso: 31 Octubre 2023].
- [28] «Termodinamica,» Ingeniería-Proyectos-Servicios, 22 abril 2019. [En línea]. Available: https://www.termodinamica.com.pe/2019/04/22/tipos-de-control-de-nivel-paracalderas/. [Último acceso: 31 Octubre 2023].
- [29] S. SARCO, Sistemas de Control modulantes en calderas de vapor, 2021.
- [30] R.-P. R. Agama Moreno J, Desarrollo de estrategias avanzadas para el control de procesos con retardo, Lima, Perú: In 2-book Editorial PUCP, 2010.

ANEXOS

Anexo 1: Código de Matlab® utilizado para el análisis de ruido.

```
T = 0.5;
            %Período de muestreo
Fm = 1/T; %Frecuencia de muestreo
L = 347;
           %Longitud de la señal
FT = 2^{nextpow2}(L);
P = fft(pres, FT)/L;
U = fft(apertura,FT)/L;
Ec = linspace(0,1,FT/2+1);
Ecl = Fm/2*Ec;
figure
subplot(2,1,1);plot(Ecl,2*abs(U(1:FT/2+1)))
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('U(f)')
grid on
subplot(2,1,2);plot(Ecl,2*abs(U(1:FT/2+1)))
xlabel('Frecuencia (HZ)')
ylabel('Y(f)')
grid on
```







Anexo 3: Herramienta de Matlab® System Identification

Anexo 4: Simulación en el Simulink de Matlab® para las configuraciones PI y PID

