



RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): ERNEY FABIAN APELLIDOS: CASTRO BECERRANOMBRE(S): ERNESTO APELLIDOS: OSORIO ESTUPIÑANFACULTAD: INGENIERÍAPLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOSE RICARDO APELLIDOS: BERMUDEZ SANTAELLATÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA CALDERA PIROTUBULAR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TÉRMICAS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER Y DISEÑO DE SU ESTRATEGIA DE CONTROL

RESUMEN

El siguiente trabajo tiene como propósito desarrollar el modelamiento matemático de una caldera pirotubular y diseño de su estructura de control, la caldera se encuentra ubicada en el laboratorio de plantas térmicas adjunto al departamento de Térmicas y Fluidos de la Universidad Francisco de Paula Santander. El modelo obtenido se desarrolló en términos de los calores específicos, la transferencia de calor se hizo globalmente, para hacer fácil el estudio de la caldera se fraccionó en dos volúmenes de control “combustión” y “caldera” sin dejar de lados la relación entre ambos “transferencia de calor”, en cada uno de los volúmenes se determinó los balances de masa y energía. La metodología se desarrolló siguiendo los siguientes lineamientos: conocimientos del fenómeno, modelamiento matemático, simulación en el dominio del tiempo y ajuste de variables, diseño de la estructura de control, simulación y ajuste fino. Finalmente el estudio proporcionó un modelo que puede ser aplicado a cualquier caldera pirotubular, horizontal de 1, 2, 3 o 4 pasos, sin importar su potencia, de forma rápida solo con mínimos ajustes.

PALABRAS CLAVE: modelado, simulación, cámara de combustión, caldera pirotubular y control de relación.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 178 PLANOS: 6 ILUSTRACIONES: 53 CD ROOM: 1

**Modelado y simulación de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la
Universidad Francisco de Paula Santander y diseño de su estrategia de control**

Proyecto de Grado Modalidad Proyecto de Investigación Presentado Para Obtener El Título De
Ingeniero Electromecánico
Universidad Francisco de Paula Santander UFPS

Erney Fabian Castro Becerra
Ernesto Osorio Estupiñan

Universidad Francisco de Paula Santander
Facultad de Ingenierías
Plan de Estudios de Ingeniería Electromecánica
San José de Cúcuta
2016

**Modelado y simulación de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la
Universidad Francisco de Paula Santander y diseño de su estrategia de control**

Erney Fabián Castro Becerra
Ernesto Osorio Estupiñan

Proyecto de Grado Modalidad Proyecto de Investigación Presentado Para Obtener El Título De
Ingeniero de Electromecánico

Msc. José Ricardo Bermúdez Santaella
Director

Universidad Francisco de Paula Santander
Facultad de Ingenierías
Plan de Estudios de Ingeniería Electromecánica
San José de Cúcuta
2016



FACULTAD DE INGENIERIAS
ACTA DE SUSTENTACIÓN PROYECTO DE GRADO
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACION

FECHA: 9 DE SEPTIEMBRE DE 2016

HORA: 3:00 PM

LUGAR: SALA 3 DEL CREAD

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TITULO DEL TRABAJO DE GRADO: "MÓDELADO Y SIMULACION DE LA CALDERA PIROTUBULAR DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER Y DISEÑO DE SU ESTRATEGIA DE CONTROL"

JURADOS: Msc. JOSE ARMANDO BECERRA VARGAS
Msc. JOHNNY OMAR MEDINA DURAN

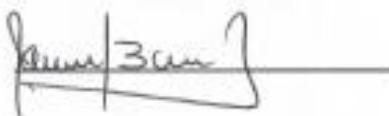
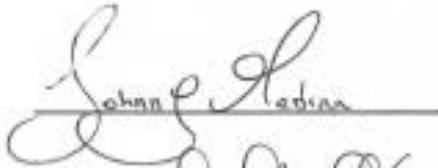
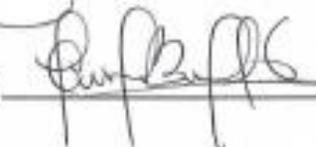
DIRECTOR: Msc. JOSE RICARDO BERMUDEZ SANTAELLA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACION
ERNESTO OSORIO ESTUPIÑAN	1090182	4.7
ERNEY FABIAN CASTRO BECERRA	1090533	4.7

OBSERVACIONES:

MERITORIA

FIRMA DE LOS JURADOS:



VoBo. COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR 

MnyL

DERECHOS RESERVADOS Copyright © 2016 por Erney Fabian Castro Becerra &Ernesto Osorio Estupiñan

Se está permitida la reproducción total o parcial de este proyecto de grado, por cualquier medio sin autorización escrita de los autores, siempre y cuando reseñen a pie de página o en la bibliografía o como referencias bibliográfica el uso de la misma.

Para referenciar este documento en norma APA:

Castro Becerra, Erney Fabian y Osorio Estupiñan, Ernesto. (2016). Modelado y simulación de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la Universidad Francisco de Paula Santander y diseño de su estrategia de control. (Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico). Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de Electricidad y Electrónica. San José de Cúcuta, Colombia.

Para referenciar este documento en norma ICONTEC:

Castro Becerra, Erney Fabian y Osorio Estupiñan, Ernesto. Modelado y simulación de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas de la Universidad Francisco de Paula Santander y diseño de su estrategia de control. (Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electromecánico). San José de Cúcuta. Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de Electricidad y Electrónica. 2016. 178p.

Dedicatoria

A mi Madre Noralba Becerra Barrera y a mis hermanas Dreisa Fernanda Castro Becerra e Iris Farleidis Castro Becerra.

Erney Fabián Castro Becerra
San José de Cúcuta 19 de septiembre de 2016

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo de mi familia, que soportó durante varias meses el ordenador y la luz encendida del recinto de estudio hasta altas horas de la madrugada, de algunos compañeros que revisaron, leyeron y compartieron la lectura de múltiples borradores del texto y del Centro de Estudios de Ingeniería Electromecánica CEIEM, que fue en él, donde aprendí la importancia de la organización, y comprendí que no es suficiente estar en último semestre, tener un promedio alto o ser becario para comprender la realidad del entorno o de la misma universidad, se necesita algo superior a eso, “LEER”.

Por eso esta obra va dedicada a mi madre Paulina Estupiñan de Osorio por eterna, dulce, encantadora, incansable y trabajadora, a mi padre Luis Emiro Osorio, que a pesar de estar en convalecencia y a veces estar alejado de la realidad siempre quiso lo mejor para todos, a mis hermanos y a toda la comunidad electromecánica, al CEIEM, y a todos los amantes e interesados por la filosofía, la historia, las ciencias humanas y fácticas, el control y la automatización, y a los que prefieren dudar de cualquier certeza sin importar la fuente, a los que prefieren decir no antes de aceptar las cosas que no han sido sometida a juicios, y a los que se decidieron hacer cosas que yo nunca pude hacer durante mi estadía. Y por supuesto, a mí mismo.

Ernesto Osorio Estupiñan
San José de Cúcuta 16 de noviembre de 2015

Agradecimientos

A mis padres Paulina Estupiñan de Osorio y Luis Emiro Osorio, por darsen a la espera, y por sobre llevar todas las vicisitudes que enmarcan un proyecto de vida.

A todos los estudiantes que me hicieron muy buenas preguntas, correcciones, valoraciones, aportes, que nos ayudaron con los software y las figuras en 2D, los cuales me digno en nombrar a continuación: Walter Cerpa Parra, Jonathan D. Rivera y Diego Alejandro Parra Peñaranda. A nuestro director del proyecto Cto. Ph.D. José Ricardo Bermúdez Santaella, por su colaboración en la elaboración del proyecto, desarrollo del modelamiento y sus correcciones. Y a los compañeros de Ing. Mecánica Guillermo A. Martheyn Lizarazo&Cristian R. Rubio.

Al compañero Jesús Alfredo Vargas Suarez por sus aportes, correcciones y guía general en la estructura del anteproyecto y desarrollo metodológico, los cuales sirvieron en el largo proceso que enmarca el sentarse a escribir los objetivos, planteamiento del problema y la justificación. Y al docente Adolfo Hitler Ibarra Romero, por lo aprendido en los dos semilleros, y en aula informal.

A los jurados Ing. Msc. José Armando Becerra Vargas y Msc. Jhon Jairo CastroMaldonado por sus aportes, valoraciones y correcciones al anteproyecto, y a mi nuevo jurado Msc. Johnny Omar Medina por sus correcciones dadas, ya que Jhon Jairo Castro por comisión de estudio tuvo que salir de la ciudad.

A la dependencia de Inventarios de la Universidad Francisco de Paula Santander, por haberme permitido realizar la figura de beca-trabajado por 6 años. A los que me acompañaron en las caminatas Franlin Orozco (Morci), (Tanainas),JonnyFabianGiraldo Carrero (Dj), Leonel Jesús Ardila (Caliche), (Borracho), German Villamil Becerra (Chávez), Osnaider Alvares Alvares(Gato), Diego Jair Ortega Sandoval (Hercules), Jerson M. Pérez Contreras, Mauricio ChacónAnaya (Ibiza), Jonathan D. Rivera (Ramiro) y últimamente a Walter Cerpa Parra, algunos de ellos no continúan con nosotros al día de hoy. Y a todas esas calles blancas, calles oscuras, calles soleadas, que brindaron los caminos para llegar a casa y viceversa.

Todo lo que he aprendido al día de hoy para la vida provenía de las largas y constantes charlas con Adolfo Hitler Ibarra Romero en su austera Aula Informal o mientras compartíamos al son de unas cervezas o de una taza de café, “aunque últimamente diezmadadas”. En los últimos meses el compartir retorno a su normalidad, con charlas amenas y variadas, que eran vistas, planteadas y analizadas bajo un espíritu reflexivo y objetivo, no puedo decir que de excelente calidad pero sí que de alta complejidad, convirtiéndose en el perfecto complemento que nunca se verá en el aula de clase. Lo mismo agradezco a las diarias charlas con mis compañeros de clase o de la Hermandad Electromecánica dadas después de salir de clases, en el CEIEM, mientras compartíamos unas cervezas o mientras realizábamos los ágapes, lo que me enseñó como establecer metas e ir por ellas. Este proyecto es el producto de alrededor de 4 horas diarias durante 10 meses aproximadamente, 1200 largas horas, que estuvieron acompañadas de noticias, entrevistas, desilusiones, correcciones, estudios, lecturas, sugerencias, esperas, nuevamente lecturas, traducciones e intriga, cartas, desmotivaciones, falta de director del Plan de estudios, angustia, perfecciones y duro trabajo.

Si me llegasen a preguntar, que si me arrepiento de algo de mi época de estudiante, diré que sí, me arrepiento de dos cosas, la primera de ellas es no haber difundido abiertamente la divulgación de nuestros trabajos, laboratorio y proyectos de vida a los demás compañeros, con la intención de que se formara una especie de “cultura de la información”, donde los mismos estudiantes observaran en que están trabajando los demás, corrigiendo y valorando dichos proyectos o propuestas, evitando así la vaga intención de solo pedir información cuando nos vemos apresurados por entregar los laboratorios. Y lo segundo de lo que me arrepiento es de haber hecho solo 3 congresos “informales” llamados, Conocimiento y Cultura Investigativa”, en vez de haber hecho muchos y en variadas áreas, pues en Electromecánica y demás carreras existen estudiantes con capacidades excepcionales para abordar temas tan variados como profundos, esto con la intención de haber formado y porque no, haber fortalecido en el estudiante una cultura investigativa. Todo lo anterior bajo la concepción de una nueva educación, una neo-educación, una educación moderna, la “Educación Informal”, rompiendo con la concepción del fetiche de los títulos, que por lo general terminan siendo exhibidos como trofeos o enriqueciendo las hojas de vida, y no por amor a la ciencia, o por la generación de nuevos conocimientos, sino por la visión individualista de cumulo de conocimiento transformándose en arrogancia.

Y por último, ¡ya se me estaba olvidando! agradecer a Diosito, la virgen María, San José y a los Reyes Magos, papa Noel y al orgón cósmico.

Ernesto Osorio Estupiñan
San José de Cúcuta 29 de marzo de 2016

Resumen

El siguiente trabajo tiene como propósito desarrollar el modelamiento matemático de una caldera pirotubular y diseño de su estructura de control, la caldera se encuentra ubicada en el laboratorio de plantas térmicas adjunto al departamento de Térmicas y Fluidos de la Universidad Francisco de Paula Santander. El modelo obtenido se desarrolló en términos de los calores específicos en vez de las entalpías como normalmente se hace, de igual forma con la transferencia de calor se hizo globalmente en vez de trabajar la radiación, convección y conducción, para hacer fácil el estudio de la caldera se fraccionó en dos volúmenes de control “combustión” y “caldera” sin dejar de lado la relación entre ambos “transferencia de calor”, en cada uno de los volúmenes se determinó los balances de masa y energía. La metodología se desarrolló siguiendo los siguientes lineamientos: conocimientos del fenómeno, modelamiento matemático, simulación en el dominio del tiempo y ajuste de variables, diseño de la estructura de control, simulación y ajuste fino. Los resultados indican que la presión de trabajo de la caldera dependerá del porcentaje de apertura de la válvula manual de salida y que entre más alta sea la presión de trabajo seleccionada dependiendo el porcentaje de apertura de la válvula, más lenta será la respuesta de la caldera al llegar a la consigna. Finalmente el estudio proporcionó un modelo que puede ser aplicado a cualquier calderapirotubular, horizontalde 1, 2, 3 o 4 pasos, sin importar su potencia, de forma rápida solo con mínimos ajustes.

Abstract

The following work has as intention develop the mathematical modeling of a boiler pirotubular and design of his structure of control, the boiler is located in the attached laboratory of thermal plants to the department of Thermal and Fluids of the University Francisco de Paula Santander. The obtained model developed in terms of the specific heats instead of the enthalpies since normally it is done, of equal form with the heat transfer it was done globally instead of the radiation, convection and conduction worked, to make the study of the boiler easy there was divided in two volumes of control "combustion" and "boiler" and the relation between both "heat transfer", in each of the volumes one determined the balance sheets of mass and energy. The methodology developed following the following limits: knowledge of the phenomenon, modeling mathematician, simulation in the dominoes of the time and adjustment of variables, design of the structure of control, simulation and thin adjustment. The results indicate that the pressure of work of the boiler will depend on the percentage of opening of the manual valve of exit and that between higher it is the pressure of work selected depending the percentage of opening of the valve, slower it will be to response of the boiler on having come to come to the slogan. Finally the study I provide a model who can be applied to any boiler pirotubular, horizontal of 1, 2, 3 or 4 steps, without importing his power, of rapid form only with minimal adjustments.

Prefacio

Este proyecto de grado está dirigido a todos y cada uno de los estudiantes de Ingeniería Electromecánica y afines, interesados en reducir el impacto ambiental, la contaminación de nuestra madre Tierra (ManibusMatriqueTerraedeberi), la simulación y diseño de estrategias de control en procesos térmicos, así como también a los interesados en producir con efectividad. El enfoque es útil para los estudiantes interesados en las plantas térmicas, la transferencia de calor, los procesos de combustión, la automatización de procesos y estudiantes de últimos semestres que se inician en el desarrollo de su proyecto de grado. Se espera que el objetivo general sea visualizado y alcanzado en su totalidad, cuando el lector de un simple vistazo o haga una revisión sistemática a este trabajo, quedando establecido antes que el requisito de grado, la trasmisión del conocimiento o como mínimo la comprensión del mismo.

Tabla de contenido

Introducción	1
1. Descripción del problema	3
1.1 Título	3
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3. Formulación del problema	4
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivo específicos	5
1.6 Viabilidad de la investigación	6
2. Marco de referencia	8
2.1 Antecedentes	8
2.2 Marco teórico	14
2.2.1 Combustible, comburente y tipos de combustión	14
2.2.2 Balance de masa y energía	20
2.2.3 Funcionamiento y teoría de las cámaras de combustión estática	21
2.2.4 Control	26
2.3 Marco conceptual	28
2.3.1 Caldera	28
2.3.2 Agua de alimentación	28
2.3.3 Volumen de control	28
2.3.4 Calores específicos	29
2.3.5 Calor sensible	29
2.3.6 Combustión y tipos de combustión	29
2.3.7 ¿Qué es el hogar de combustión o cámara de combustión	30
2.3.8 Inquemados	30
2.3.9 Variable controlada y variable manipulada	30
2.3.10 Control proporcional P, Control proporcional-Integral PI y PID	30
2.3.10.1 Control proporcional	31

2.3.10.2 Control proporcional + Integral PI	32
2.3.10.3 Control proporcional + Integral+ Derivativo	33
2.3.11 Control de relación	35
2.3.12 Bias	36
2.4 Marco legal	37
3. Hipótesis	38
4. Diseño metodológico	39
4.1 Tipo de investigación	39
4.2 Limitaciones	39
4.3 Actividades metodológicas	39
5. Caldera, combustible, comburente y estequiometria de la combustión	42
5.1 Caldera	42
5.2. Combustible	50
5.3. Comburente	52
5.4. Estequiometria de la combustión	52
6. Modelamiento: Balance de masa, balance de energía y transferencia de calor	55
6.1 Balance de masa y energía del volumen de control “combustión”	58
6.2 Transferencia de calor o energía transferida “combustión” – “caldera”	61
6.3Balance de masa y energía en el volumen de control “caldera”	63
7. Simulación	69
7.1 Modelamiento y simulación de la reacción química “oxidación del combustible”	69
7.2 Modelamiento y simulación del volumen de control “combustión”	73
7.3 Modelamiento y simulación de la transferencia de calor	80
7.4 Modelamiento y simulación del volumen de control “caldera”	82
8. Selección de la estructura de control	95
9. Interface Hombre-Máquina HMI	104
9.1 Criterios de diseño para la HMI	104
9.2 Ventana principal	108
10. Pruebas y resultados	110
11. Planos	123
11. 1 Plano de instrumentación	123
11.2 Planos esquemáticos	126

12. Selección de la instrumentación	132
12.1 Selección de los sensores de presión para la placa orificio	133
12.2 Selección del sensor de presión de vapor saturado de la caldera	140
12.3 Selección del sensor de temperatura del vapor saturado de la caldera	140
12.4 Selección del sensor de temperatura para los gases de combustión	144
12.5 Selección de la válvula de apertura y cierre para el combustible	145
12.6 Selección del sensor de flujo de combustible	145
12.7 Selección del sensor de aire	146
12.8 Selección de los sensores de presión y temperatura del agua de alimentación	147
13. Nombres de las personas que participan en el proceso	148
14. Recursos disponibles (materiales, institucionales y financieros)	149
15. Cronograma de actividades	151
16. Conclusiones y Recomendaciones	152
Referencias	154