

**VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE
COMBUSTIÓN GENERADOS POR LA UIS Y CORPOICA PARA CÁMARAS DE
HORNILLAS PANELERAS TIPO WARD-CIMPA**

**HARVEY STEVE ROJAS AVILA
MARVIN ANDRÉS CASTELLANOS TOVAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

**VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE
COMBUSTIÓN GENERADOS POR LA UIS Y CORPOICA PARA CÁMARAS DE
HORNILLAS PANELERAS TIPO WARD-CIMPA**

**HARVEY STEVE ROJAS AVILA
MARVIN ANDRÉS CASTELLANOS TOVAR**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Directores:

**CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA
Ingeniero Químico, MSc.
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**LUZ ESPERANZA PRADA FORERO
Ingeniera Química, Espc. Edu. con NTC
CORPOICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

NOTA ACLARATORIA

El presente trabajo de tesis de grado forma parte del proyecto de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA: titulado **Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de Panela en Colombia**, y fue dirigido y financiado parcialmente por CORPOICA.

Por tanto, los derechos de autor son propiedad del **estudiante, de la Universidad Industrial de Santander y de CORPOICA** y los resultados obtenidos podrán ser transferidos a la sociedad colombiana en actividades sin ánimo de lucro.

DEDICATORIA

*A **Dios**, excelsa fuente de fortaleza y sabiduría que me ha iluminado en este camino largo que aún no termina.*

*A mis padres **Jesús Duqueiro** y **María Trigidia**, que con su amor y ejemplo de vida han sido el apoyo y el motivo para no desmayar en los momentos difíciles.*

*A mis hermanas **Lorena** y **Erika**, por su amor, compañía y apoyo.*

A toda mi familia, que siempre estuvo pendiente de mi progreso.

A la paz de mi corazón, a quien agradezco por estar conmigo cada segundo que lo necesité, por ser fuente de inspiración y por tenerme siempre en su pensamiento a pesar de los problemas.

A mis amigos, que estuvieron presentes en este proceso de formación como críticos constructivos y de quienes nunca olvidaré los momentos de risa que rejuvenecen el alma.

HARVEY

DEDICATORIA

*A mis padres, **Bernardo Castellanos** y **María Yaneth Tovar**,
por guiarme toda una vida con su sabiduría y su infinito
amor, por enseñarme a no desfallecer frente a las
adversidades, por mostrarme su confianza incondicional,
hoy éste triunfo es suyo.*

*A toda mi familia, que me apoyó en todo momento;
con cariño y fe siempre estuvieron presentes*

MARVIN

AGRADECIMIENTOS

A **Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico, MSc.**, director del proyecto por parte de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por su orientación y colaboración.

A **Luz Esperanza Prada Forero, Ingeniera Química**, directora del proyecto por parte de CORPOICA, por su colaboración y asesoría durante la ejecución del proyecto.

A **Hugo Reynel García, Ingeniero Agronomo, MSc.**, por su colaboración y asesoría durante la ejecución del proyecto.

Un agradecimiento muy especial a **Eugenio Kopp Sanabria**, por su amistad, su colaboración y orientación durante el trabajo de campo en consideración a su gran esfuerzo.

A **Janika Luna y Oscar Mendieta**, profesionales del CIMPA, por su acompañamiento y colaboración durante la fase experimental.

A todo el grupo de trabajo de CORPOICA E.E. CIMPA, por su colaboración y gestión durante todo el desarrollo del trabajo.

A las investigadoras y trabajadoras del CEIAM, por su colaboración y gestión.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA.....	4
2.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL BAGAZO DE CAÑA COMO COMBUSTIBLE	5
2.2.1. Composición del bagazo	5
2.2.2. Humedad de bagazo	5
2.2.3. Poder calorífico del bagazo	6
2.3. COMBUSTIÓN	7
2.3.1. Fases de la combustión	7
2.4. FUNDAMENTO MATEMÁTICO DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA.....	8
2.5. CÁMARAS DE COMBUSTIÓN	12
2.5.1. Cámaras de combustión Ward-CIMPA	12
2.5.2. Diseño de las cámaras de combustión.....	13
3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	15
3.1. FIJACIÓN DE LAS VARIABLES.....	15
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MONTAJES Y EQUIPOS.....	16

3.3.	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA	17
3.3.1.	Balances de materia.....	18
3.3.2.	Balances de energía	19
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	21
4.1.	VARIACIÓN DEL EXCESO DE AIRE CON EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN Y LA POSICIÓN DE LA VÁLVULA	21
4.2.	ESTUDIO DE LA CANTIDAD DE NO QUEMADOS EN EL MATERIAL PARTICULADO	23
4.3.	ESTUDIO DE LA FORMACION DE CO	24
4.4.	ESTUDIO DE LA FORMACION DE CO ₂	25
4.5.	PERFILES DE TEMPERATURA	25
4.6.	ESTUDIO DE LA POTENCIA DESARROLLADA CON EL EXCESO DE AIRE	27
4.7.	ESTUDIO DE LA POTENCIA DESARROLLADA CON EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN.....	28
4.8.	ESTUDIO DE LA EFICIENCIA CON EL EXCESO DE AIRE	29
4.9.	COMPARACIÓN DE LOS DATOS REALES Y LOS SIMULADOS CON LOS MODELOS MATEMÁTICOS PROPUESTOS.....	30
4.9.1.	Comparación energética de los datos reales con los simulados.....	31
4.10.	ANÁLISIS DE VARIANZA.....	31
4.10.1.	Comparación de las variables básicas de diseño de las cámaras de combustión.....	31
4.10.2.	Comparación de la potencia/volumen desarrollada por la cámara.....	36
4.11.	CORRELACIÓN DE LOS DATOS REALES Y SIMULADOS.....	38
5.	CONCLUSIONES	40

6.	RECOMENDACIONES.....	42
7.	BIBLIOGRAFIA.....	43
	ANEXOS.....	47

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Descripción de la elaboración de panela.....	4
FIGURA 2. Cámara de combustión Ward-CIMPA	13
FIGURA 3. Puntos de medición de temperaturas en la cámara de combustión	17
Figura 4. Entradas y salidas de materia en la cámara de combustión.....	17
FIGURA 5. Entradas y salida de energía en la cámara de combustión	19
FIGURA 6. Exceso de aire vs periodo de alimentación	22
FIGURA 7. Porcentaje de no quemados en material particulado vs exceso de aire	23
FIGURA 8. Fracción de CO vs exceso de aire.....	24
FIGURA 9. Fracción de CO ₂ vs exceso de aire.....	25
FIGURA 10. Temperatura vs tiempo.....	26
FIGURA 11. Potencia desarrollada/volumen vs exceso de aire	28
FIGURA 12. Potencia desarrollada/volumen vs periodo de alimentación.....	29
FIGURA 13. Eficiencia vs exceso de aire	30
FIGURA 14. Comparación del volumen de cámara real y simulado.....	34
FIGURA 15. Comparación del área de parrilla real y simulada	35
FIGURA 16. Comparación de potencia real y la potencia simulada	37
FIGURA 17. Curva de regresión ajustada para la potencia simulada vs potencia real.....	38

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Resumen del análisis de varianza para el volumen de cámara real y simulado	35
TABLA 2. Resumen del análisis de varianza para el área de parrilla real y simulada	36
TABLA 3. Resumen del análisis de varianza para las potencias/m ³ reales y simuladas.....	37
TABLA 4. Estadística de la regresión para las potencias real y simulada	39
TABLA 5. Análisis de varianza y parámetros de la regresión	39

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1. Resultados reales y simulados.....	32
--	----

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Planos de una hornilla panelera tipo Ward-CIMPA.....	48
ANEXO B. Equipos y materiales utilizados en la experimentación	49
ANEXO C. Montajes de los equipos en campo.....	51
ANEXO D. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla 1..	52
ANEXO E. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla 2..	57
ANEXO F. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla 3..	62
ANEXO G. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla 4 .	67
ANEXO H. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla 5..	72
ANEXO I. Composición de los gases de combustión en fracción volumétrica.....	77
ANEXO J. Potencias suministradas, exceso de aire y pérdidas en las cámaras de combustión	79

GLOSARIO

BAGAZO DE CAÑA: residuo de la caña de azúcar que queda después de la extracción de los jugos en el molino y es utilizado como combustible en la hornilla panelera.

CÁMARA DE COMBUSTIÓN: espacio confinado en la parte anterior de la hornilla panelera, cuya función es mezclar el bagazo con el aire para producir la reacción de combustión.

PERIODO DE ALIMENTACIÓN: tiempo transcurrido entre una cargada de bagazo a la cámara de combustión y la posterior.

GASES DE COMBUSTIÓN: gases producidos por la reacción de combustión del bagazo, descargados a la atmosfera después de pasar a través del ducto de humos y transferir su calor sensible a las pailas para concentrar los jugos de la caña. Están compuestos principalmente de CO, CO₂, O₂ y N₂.

HORNILLA PANELERA: instalación donde se transforma la energía del bagazo en energía calórica para realizar las etapas de clarificación, evaporación y concentración de los jugos de la caña para obtener la panela.

TRAPICHE: instalación donde se procesa la caña de azúcar para producir la panela.

RESUMEN

TITULO: VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE COMBUSTIÓN GENERADOS POR LA UIS Y CORPOICA PARA CÁMARAS DE HORNILLAS PANELERAS TIPO WARD-CIMPA.*

AUTORES: Harvey Steve Rojas Avila; Marvín Andrés Castellanos Tovar.**

PALABRAS CLAVES: combustión, potencia, Ward-CIMPA, bagazo, gases de combustión.

DESCRIPCIÓN:

De estudios hechos a nivel piloto por la UIS y CORPOICA en el 2004, para el mejoramiento de la combustión de bagazo en las cámaras de hornillas Ward-CIMPA, surgió una propuesta que incluye modelos matemáticos fundamentados en los principios termodinámicos para describir la combustión y nuevos parámetros de operación y diseño de las cámaras, que permiten teóricamente mejoras en las eficiencia hasta de un 7%.

En este trabajo se presenta un estudio a nivel industrial en la Hoya del Río Suárez para la validación de los modelos matemáticos propuestos y la comprobación de los parámetros de operación; periodo de alimentación de 90s y exceso de aire de 55% a 60%.El trabajo se realizó mediante una investigación experimental cuantitativa, dividida en una fase experimental y otra explicativa. Se aplicó un diseño experimental en bloques completamente al azar para cinco hornillas paneleras comerciales a fin de comprobar los parámetros básicos de diseño volumen de cámara y área de parrilla y un diseño experimental factorial 3x3 para los parámetros de operación periodo de alimentación y exceso de aire.

Mediante un análisis de varianza se encontró que los modelos propuestos predicen los parámetros de diseño de las cámaras de combustión con un nivel de confianza del 95%. Se obtuvieron nuevas correlaciones para el exceso de aire y la cantidad de material particulado no quemado, que fueron introducidos como ajuste al modelo de combustión propuesto. Se encontró que los parámetros de operación propuestos en el 2004 afectan la eficiencia de la cámara hasta en un 4%. Los parámetros de operación fueron ajustados a valores de 150s para el periodo de alimentación de bagazo y 58% a 61% de exceso de aire que se logran con entrada de 0,315 a 0,321kmol de aire por kilogramo de bagazo seco alimentado.

* Proyecto de grado.

**Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directores: MSc. Crisostomo Barajas Ferreira, Ing. Luz Esperanza Prada Forero.

ABSTRACT

TITLE: VALIDATION AND ADJUSTMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF COMBUSTION GENERATED BY THE UIS AND CORPOICA TO COMBUSTION CHAMBER OF PANELA OVEN TYPE WARD-CIMPA.*

AUTHORS: Harvey Steve Rojas Ávila; Marvin Andrés Castellanos Tovar.♣♣

KEYWORDS: combustion, power, Ward-CIMPA, bagasse, combustion gases.

DESCRIPTION:

In laboratory studies done at the UIS and CORPOICA in 2004, to improve the combustion of bagasse in the Ward-CIMPA combustion chamber of panela oven, came a proposal that includes mathematical models based in the principles of thermodynamics to describe the combustion and parameters new of operating and design of combustion chamber that allow theoretically improvements in efficiency up to 7%.

This paper presents a study executed in the industry on Hoya of river Suárez for the validation of the proposed mathematical models and verification of operating parameters; for feed rate of 90s and excess air of 55% to 60%. The work was conducted through a quantitative experimental investigation, is divided into an exploratory phase and explanatory phase. Experimental design was applied in a randomized block for five commercial panela oven to verify the basic design parameters (combustion chamber volume and grill area) and a 3X3 factorial experimental design for the operating parameters feed rate and excess air.

Through an analysis of variance was found that the proposed models predict the design parameters of the combustion chambers with a confidence level of 95%. New correlations were obtained for the excess air and the amount of unburned particulate matter, which were introduced as an adjustment to the proposed models. It was found that the operating parameters proposed in 2004 affect the efficiency of the camera up to 4%. The operating parameters were adjusted to values of 150s for bagasse feed rate and excess air the 58% to 61% that is achieved with input from 0.315 to 0.321 kmol of air per pound of dry bagasse fed.

* Degree work.

**Industrial University of Santander, Faculty of Physicochemical Engineerings, School of Chemical Engineering. Directors: MSc. Crisostomo Barajas Ferreira, Ing. Luz Esperanza Prada Forero.

INTRODUCCIÓN

En vista al requerimiento de mejorar los métodos de cálculo para la obtención de los parámetros de diseño y operación de las cámaras de combustión Ward-CIMPA, en el 2004 la UIS y CORPOICA en su E.E. CIMPA, realizaron un nuevo estudio a nivel de planta piloto bajo condiciones controladas, a partir del cual se obtuvo una propuesta basada en el modelamiento termodinámico de la combustión del bagazo, la cual permite un diseño más riguroso de la cámara de combustión y propone unos parámetros de operación que mejoran su potencia.

Sin embargo, los avances obtenidos con estos modelos matemáticos, aun no han sido validados en las hornillas paneleras comerciales. Ésta etapa es fundamental para la comprobación y ajuste de la exactitud de los modelos y de los respectivos parámetros de diseño y operación obtenidos.

La propuesta de diseño se basa en las investigaciones hechas por el CIMPA en los últimos 24 años y utiliza los fundamentos termodinámicos de las reacciones que ocurren en la cámara, para describir el fenómeno de combustión y determinar las variables: potencia, exceso de aire requerido y periodo de alimentación, necesarios para obtener las dimensiones básicas de diseño de la cámara: volumen de cámara y área de parrilla.

Las mencionadas investigaciones han permitido alcanzar mejoras técnicas en el diseño y la eficiencia de las hornillas. Así en la actualidad se cuenta con diseños de hornillas con cámara Ward-CIMPA, las cuales tienen eficiencias alrededor del 40%, no requieren secado previo del bagazo y alcanzan temperaturas hasta de 1.200°C en la cámara de combustión. Estas mejoras se ven reflejadas económicamente en la disminución de los costos de producción comparado con

los costos generados en las hornillas tradicionales, las cuales solo alcanzan eficiencias promedio del 33% y temperaturas máximas de 750°C a 850°C.¹

Los beneficios de estos adelantos técnicos, no se reflejan solamente en lo económico, sino que presentan su mayor aporte en el cuidado del medio ambiente al disminuir el consumo de leña casi en totalidad y mejorar la combustión. Si se tiene en cuenta que para el 2005, Agrocadenas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) reporta una producción de panela de 1'600.000t, entonces el consumo de leña adicional al bagazo sería de 800.000t_{leña}/año, con emisiones a la atmosfera de 5'096.000t_{CO2}/año y 208.000t_{CO}/año.²

Las investigaciones hechas a nivel piloto en el 2004, reportaron los siguientes parámetros de operación: exceso de aire de 55% a 60% y periodo de alimentación de 90s y un diseño mejorado de la cámara, que mejoran la eficiencia teórica hasta en un 7%.³ Para la validación de lo anterior, se aplicó un diseño experimental de cinco bloques al azar combinado con un diseño experimental factorial 3x3 y se hizo un análisis de varianza con prueba estadística F.

Este trabajo se desarrolló dentro del marco del proyecto “Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de Panela en Colombia” financiado por el Ministerio de Agricultura y ejecutado por CORPOICA y la UIS.

¹ García B., Hugo R. Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de Panela en Colombia, Proyecto CONVOCATORIA NACIONAL I+D SECTOR AGROPECUARIO 2007.

² I.A. M.Sc Hugo R., GARCIA B. – M.V.Z. Luis C., ALBARRACIN C. – I.Q. Adriana TOSCANO LATORRE. – I.A. Natalia J. SANTANA M. – I.A. Orlando INSUASTY B. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. Tibaitatá 2007

³ SOLER V., Juan P. y GÓMEZ T., Franco H. Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA y Plana-CIMPA en hornillas paneleras. Bucaramanga, 2004. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Validar los modelos matemáticos de combustión propuestos por la UIS y CORPOICA en el 2004, para el mejoramiento del diseño de la cámara de combustión de hornillas paneleras Ward-CIMPA.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comprobar los parámetros de diseño de la cámara de combustión (volumen de cámara y área de parrilla) en una muestra de hornillas paneleras comerciales ubicadas en la hoya del río Suárez.

Demostrar que la relación de los parámetros de operación: periodo de alimentación y exceso de aire propuesta por CORPOICA y la UIS en el 2004 para el desarrollo de los modelos matemáticos de combustión, ofrecen las mejores condiciones de operación para hornillas paneleras Ward-CIMPA.

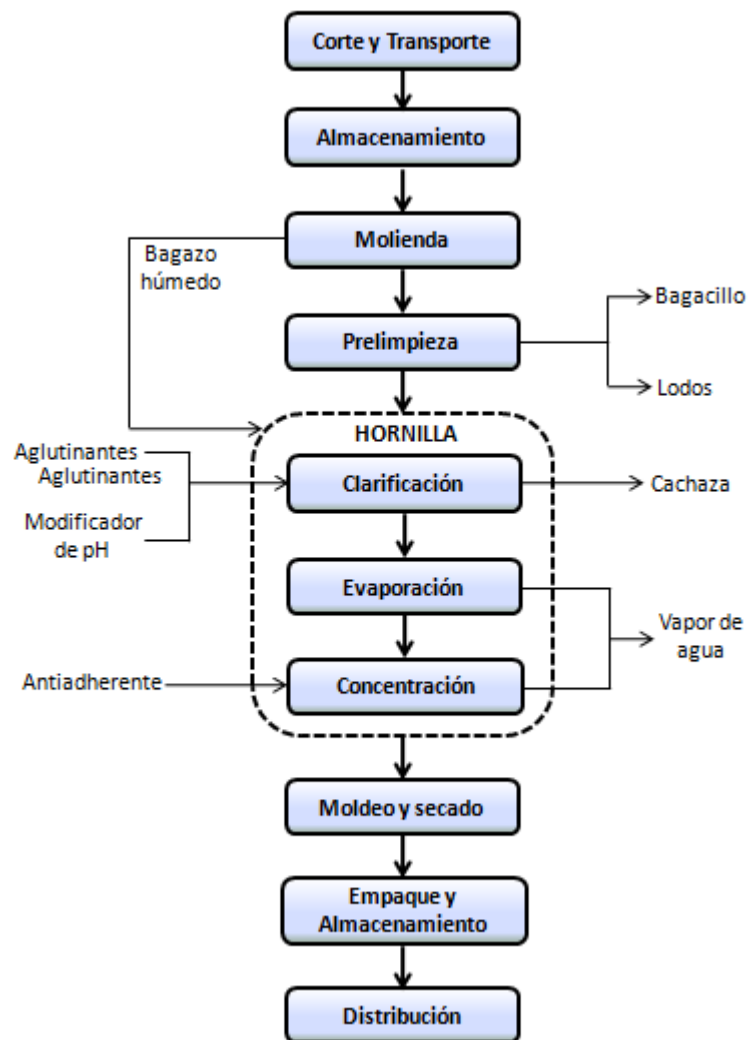
Desarrollar una hoja de cálculo, que permita la obtención de los parámetros de diseño y operación apropiados para las cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA en las hornillas paneleras.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA

En la Figura 1 se muestra la descripción de la elaboración de panela.

FIGURA 1. Descripción de la elaboración de panela



Fuente: Archivos CIMPA

2.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL BAGAZO DE CAÑA COMO COMBUSTIBLE

En la producción de panela, el bagazo es utilizado como combustible en la hornilla para la evaporación del agua contenida en los jugos de la caña. En las hornillas con cámara Ward-CIMPA, se puede utilizar bagazo directamente salido del molino ó mezclado con el bagazo residual con menor contenido de humedad. El tamaño apropiado del bagazo para un buen desempeño de la cámara, depende de la variedad de la caña y de la extracción del molino que debe estar entre 57% a 60%.

2.2.1. Composición del bagazo

El bagazo es un material fibroso, obtenido como residuo de la extracción de los jugos de la caña de azúcar; heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad que varía de 50% a 60% según la eficiencia del molino.⁴

La composición del bagazo en base seca determinada por análisis próximo varía según la variedad de la caña, madurez y condiciones agroecológicas del cultivo. Hugot,⁵ determinó, para una mezcla promedio de algunas variedades de caña, una composición química elemental promedio para el bagazo en base seca de: 47% de carbón, 44% de oxígeno, 6,5% de hidrógeno y 2,5% de cenizas. La formula empírica para el bagazo determinada experimentalmente corresponde a $C_{3,73}H_{6,3}O_{2,98}N_{0,00129}$.

2.2.2. Humedad de bagazo

El contenido de humedad del bagazo depende de la variedad de caña, de los parámetros de proceso de la extracción de los jugos y del tiempo de almacenamiento. Se expresa como una fracción másica del contenido de agua sobre una base total.

⁴ MERENCIO, Deny; GIRALDO, Gregorio. Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado.

⁵ HUGOT, E., Manual para ingenieros azucareros, Cia. Editorial continental, S.A., México 1992.

2.2.3. Poder calorífico del bagazo

Hay dos tipos de poder calorífico de los combustibles: uno denominado Valor Calórico Superior (VCS) y otro denominado Valor Calórico Inferior o Neto (VCN).

El primero corresponde a la energía teórica producida por la combustión de un kilogramo de combustible a 0°C y 1atm y donde los productos de combustión se reducen a las mismas condiciones. Además, el agua presente en el combustible así como aquella formada por la oxidación del hidrógeno, se condensan.

El segundo es determinado a partir del anterior suponiendo que el agua presente en el combustible así como la formada en la combustión, permanecen como vapor.⁶

Debido a que en la práctica industrial es imposible reducir la temperatura de los productos de combustión hasta el punto de rocío, el VCN es el que indica en forma más precisa sobre la energía que puede obtenerse realmente de un combustible; por lo tanto es el utilizado en los cálculos.

Debido a que la condensación del agua en la determinación del VCS sucede en las cercanías de 10°C para el cual el calor latente de evaporación del agua (λ) es 2477,7 kJ/kg,⁷ se tiene que:

$$\text{VCN} = \text{VCS} - 2477,7E \quad (2.1)$$

Según Hugot, el VCS del bagazo es aproximadamente 19.300kJ/kg. Valor promedio obtenido del análisis de una muestra representativa de diferentes variedades de caña, con diferente manejo agronómico y en diferente época del año. Teniendo en cuenta lo anterior, se determina el VCN del bagazo como:

$$\text{VCN} = 19300 - 2477,7E$$

Haciendo un balance para la oxidación del hidrógeno presente en el bagazo:

⁶ GARCIA, Hugo y GORDILLO, Gerardo. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa, 1992

⁷ J. M., Smith; H. C. Van Ness y M. M. Abbott. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 5 ed. McGraw-Hill. México, 1996.



$$1\text{kgH} + 8\text{kgO}_2 = 9\text{kgH}_2\text{O} \quad (2.3)$$

$$E = 9H \quad (2.4)$$

Remplazando los valores en la ecuación 1.1 se tiene que el VCN del bagazo seco es 17850,5kJ/kg.

Para determinar el VCN del bagazo húmedo, se debe tener en cuenta la energía necesaria para vaporizar el agua contenida en el bagazo y está dada por la siguiente ecuación:⁶

$$\text{VCN} = 17850,5 - 20350 * \frac{\%H_b}{100} \quad (2.5)$$

Donde %H_b es la humedad del bagazo dada como porcentaje en peso.

2.3. COMBUSTIÓN

La combustión de bagazo ocurre cuando este se mezcla con el oxígeno del aire y reacciona para producir dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua y calor. En el proceso de combustión existe una cantidad mínima de aire denominada aire teórico, esta es capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para una combustión completa de carbono, hidrógeno y cualesquiera otros elementos susceptibles de ser oxidados. En la práctica, solo se obtiene combustión completa cuando se añade al proceso una cantidad de aire en exceso; esto debido a la dificultad de mezclar el aire con el combustible (OCÓN, 1964).

2.3.1. Fases de la combustión

Secado de combustibles sólidos: dentro del horno, las partículas de combustible reciben calor por radiación, convección y conducción por parte de los gases que abandonan el horno. El agua contenida en las partículas es vaporizada y forzada rápidamente fuera de estas antes de que los volátiles sean liberados.

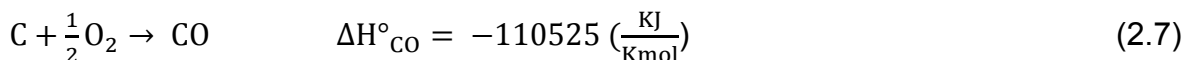
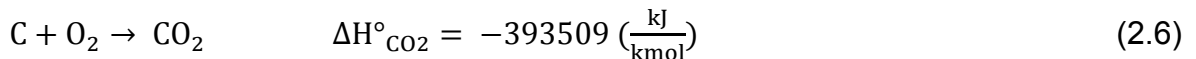
Devolatilización de combustibles sólidos: terminado el secado, la temperatura aumenta y el sólido comienza a descomponerse en una etapa de pirólisis, dando lugar a la liberación de volátiles antes de la combustión del carbono.

Combustión del carbón: en esta fase se liberan los no volátiles, el oxígeno se difunde por medio de la frontera externa del lecho y penetra en las partículas altamente porosas del carbón. La velocidad de la reacción química entre el carbono y el oxígeno depende de la difusión del oxígeno desde la superficie hasta el interior del carbono, por lo cual se debe tener en cuenta la concentración de oxígeno, temperatura del gas, número de Reynolds, tamaño y porosidad del carbón. La reacción en la superficie genera primariamente CO, que reacciona fuera de la partícula para formar CO₂ y completar la reacción.

2.4. FUNDAMENTO MATEMÁTICO DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA

A continuación se presentan las tres etapas con las cuales se describe la combustión del bagazo en la cámara WARD-Cimpa. Estas etapas ocurren de manera secuencial, es decir que la finalización de una etapa indica el comienzo de la posterior.

La primera etapa es la oxidación del carbono. Las reacciones que la describen junto con las entalpías de reacción a condiciones estándar de 298K y 1atm son:



Para la reacción de la ecuación 2.6, se sugiere una conversión de tipo lineal determinada experimentalmente:

$$C = C_0 + C_1 * T_{ad} \quad (2.8)$$

Donde: T_{ad} es la temperatura adiabática de la etapa de reacción, C es la conversión total y C_0 y C_1 son constantes con valores de 91 y 0,008 respectivamente, determinadas empíricamente.

El carbono restante se oxida a monóxido de carbono con una conversión total.

Los flujos másicos de entrada son valores conocidos; es decir que la cantidad de carbono se puede determinar, así como la cantidad de oxígeno necesario para oxidarlo. Como se dispone de los datos de conversión para las dos reacciones, solo falta conocer la T_{ad} para tener totalmente definido los balances de masa para esta primera etapa.

Para el cálculo de la temperatura adiabática, se supone que no existe transferencia de calor con los alrededores; es decir $Q = 0$, además con las hipótesis adicionales de que los cambios en las energías cinética, potencial y el trabajo de flecha son despreciables. El balance de energía completo para la fase puede escribirse como:

$$\Delta H_{T1} = 0 = \Delta H_r^\circ + R * (\Delta A(T_{ad} - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T_{ad}^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T_{ad}^3 - T_0^3) - \Delta D(T_{ad}^{-1} - T_0^{-1})) \quad (2.9)$$

$$\Delta H_r^\circ = \Delta H_{bag}^\circ + \Delta H_{CO2-CO}^\circ \quad (2.10)$$

$$\Delta A = \sum A_i v_i \quad (2.11)$$

Donde:

ΔH_{T1} = cambio de entalpia de la primera etapa.

R = constante universal de los gases.

T_0 = temperatura de referencia.

ΔH_r° = calor estándar de reacción a 25°C

ΔH_{bag}° = calor de combustión del bagazo

ΔH_{CO2-CO}° = calor estándar por conversión de CO_2 a CO .

ΔA = la sumatoria de las constantes para las capacidades caloríficas de cada componente multiplicada por su coeficiente estequiométrico en la reacción. Las demás expresiones para ΔB y ΔD son análogas.

Con la ayuda de los coeficientes para las capacidades caloríficas y las cantidades iniciales de las sustancia presentes, se puede despejar el valor de T_{ad} de la ecuación 2.9 y así quedan totalmente definidas las corrientes de entrada y salida de la etapa de oxidación del carbono.

En la segunda etapa ocurre la reacción de equilibrio:



Las condiciones iniciales están definidas por las condiciones de salida de la primera etapa. Para definir completamente las corrientes de salida de la segunda etapa, se plantea un balance de energía y una ecuación de equilibrio.

Si ΔH° es función de la temperatura, se tiene que para la constante de equilibrio K_e :

$$\ln K_e = \int \frac{\Delta H^\circ}{R} dT + I \quad (2.13)$$

Puesto que:

$$\Delta H_i^\circ = \int \Delta C_p^\circ dT + J \quad (2.14)$$

Utilizando la definición de ΔC_p° y reemplazando para $\frac{\Delta H}{R}$, se tiene que:

$$\frac{\Delta H}{R} = \frac{J}{R} + (\Delta A)T + \frac{\Delta B}{2}T^2 + \frac{\Delta C}{3}T^3 - \frac{\Delta D}{T} \quad (2.15)$$

Resolviendo la integral para $\ln K_e$:

$$\ln K_e = -\frac{J}{RT} + (\Delta A)\ln T + \frac{\Delta B}{2}T^2 + \frac{\Delta C}{6}T^3 + \frac{\Delta D}{2T^2} + I \quad (2.16)$$

y reemplazando $\Delta G^\circ = -RT \ln k$

$$\Delta G^\circ = J - R * T * (\Delta A * \ln(T) + \frac{\Delta B}{2} * T + \frac{\Delta C}{6} * T^2 + \frac{\Delta D}{2} * T^2 + I) \quad (2.17)$$

Donde K_e es únicamente función de la temperatura y las constantes de integración I y J se obtienen a partir de un estado de referencia conocido, normalmente a condiciones estándar.

Para hallar las composiciones de salida en el equilibrio, se utiliza la siguiente definición:

$$K_e = \frac{Y_{H_2} \cdot Y_{CO_2}}{Y_{CO} \cdot Y_{H_2}} \quad (2.18)$$

$$Y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_{i0} + v_i \varepsilon_e}{n_0 + v \varepsilon_e} \quad (2.19)$$

Donde:

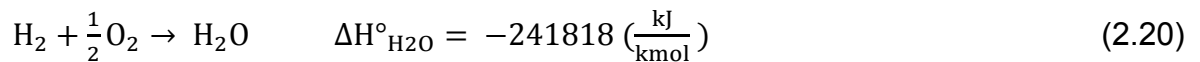
ε_e = grado de avance de la reacción en el equilibrio

n_{i0} = número de moles iniciales del componente i .

n_0 = número de moles iniciales totales.

v = sumatoria algebraica de los coeficientes estequiométricos de la reacción.

Por último ocurre la oxidación del hidrógeno para la formación de agua, con una conversión total del hidrógeno:



En este caso el cambio de entalpía total ΔH_{T_2} para la reacción tiene en cuenta el cambio de llevar los componentes de entrada hasta la temperatura estándar (298 K), la posterior reacción de los mismos y el cambio de entalpía de los productos desde las condiciones estándar hasta la temperatura adiabática final, es decir que la trayectoria a seguir está conformada por tres tramos los cuales quedan representados correctamente con la siguiente expresión:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{comp} + \Delta H_{H_2O}^\circ + \Delta H_p \quad (2.21)$$

Donde:

ΔH_{comp} = cambio de entalpia de los componentes de entrada desde la temperatura de salida de la segunda etapa hasta la temperatura de referencia.

$\Delta H_{H_2O}^\circ$ = calor estándar de la reacción de oxidación de hidrógeno.

ΔH_p = cambio de entalpia de los productos desde la temperatura de referencia hasta la T_{ad} final.

La T_{ad} final se calcula a partir de la definición de la ecuación 2.9, cambiando ΔH_r° por $\Delta H_{H_2O}^\circ$ y utilizando las composiciones de salida de la última etapa.

2.5. CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Es el espacio confinado ubicado en la parte anterior de la hornilla, su función es mezclar el bagazo con el aire en un sistema de lecho de carga sobre la parrilla para producir la reacción de combustión y liberar la energía interna del bagazo. Está compuesta por una puerta de alimentación por donde el hornero introduce el bagazo, una parrilla con un área libre de 40% a 60% que sostiene el bagazo y permite la entrada de aire necesario para la combustión y un cenicero ubicado en la parte inferior de la parrilla por el cual entra el aire para la combustión y donde se almacenan las cenizas que caen por el área libre de la parrilla.

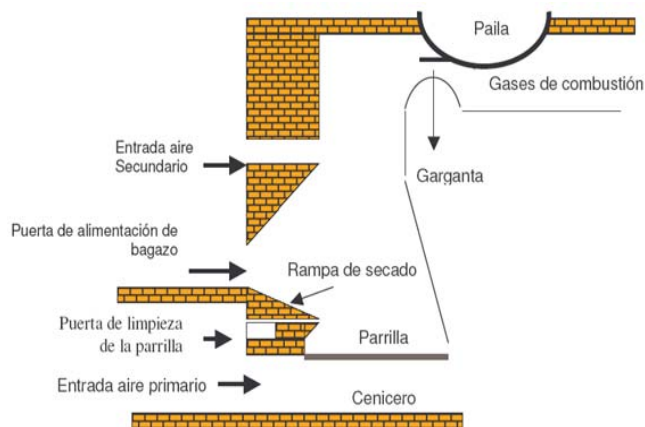
2.5.1. Cámaras de combustión Ward-CIMPA

Este tipo de cámara presenta dos características especiales que se muestran en la Figura 2, la primera es una rampa donde se precalienta el bagazo antes de quemarse y se evapora la humedad contenida por medio de la energía radiante proveniente de la masa de bagazo incandescente de la cámara, ésta característica permite introducir el bagazo recién salido del molino con humedades cercanas al 55% en peso. La segunda es que el aire requerido para la combustión se suministra en dos corrientes; una de aire primario que circula a través de la parrilla y que corresponde al 70% del volumen total de diseño, y otra de aire secundario

correspondiente al 30% restante, que se suministra en la parte superior de la cámara Ward por medio de tubos cilíndricos.⁵

La cámara Ward-CIMPA obtiene mayor estabilidad en términos de temperatura y potencia con el tiempo, puede alcanzar temperaturas hasta de 1200°C, con una producción promedio de CO de 3% Vol. y 14% Vol. de CO₂ cuando se le suministra un exceso de aire del 60% y una humedad promedio del bagazo del 45%.²

FIGURA 2. Cámara de combustión Ward-CIMPA



Fuente: Archivos CIMPA

2.5.2. Diseño de las cámaras de combustión

Las dimensiones de la cámara dependen de la capacidad de producción para la cual se diseña la hornilla.⁶ Se calculan a partir de parámetros básicos de diseño, que relacionan la potencia con el área de parrilla y el volumen de la cámara.

Factor de parrilla:* 901kW/m² y 874kW/m² para un área libre de parrilla de 40% y 60% respectivamente.²

* Factor de parrilla: se define como la potencia generada por unidad de área (kW/m²) en la cámara de combustión.

Factor de volumen:** se determina valiéndose del modelamiento termodinámico de la combustión y la aplicación del concepto de velocidad de ignición junto con la ecuación del gas ideal.²

$$V_{ign} = \frac{m_{bag-carg}}{F} \quad (2.22)$$

Donde: V_{ign} es la velocidad de ignición ($kg \cdot s^{-1}$)*, $m_{bag-carg}$ la masa de bagazo alimentado en una cargada (kg) y F el periodo de alimentación (s).

Entonces el volumen de la cámara se halla aplicando la ecuación del gas ideal:

$$V = \frac{V_{ign} \cdot n \cdot t \cdot R \cdot T_{ad}}{P} \quad (2.23)$$

Donde: V es volumen de la cámara (m^3), n el número de moles totales estimadas ($kmol/kg_{bagazo}$), t el tiempo transcurrido (s), T_{ad} la temperatura de llama adiabática obtenida en la última etapa de combustión en K y P la presión atmosférica en Pa.

Entonces el factor de volumen se define como:

$$F_v = E_{sum}/V \quad (2.24)$$

$$E_{sum} = (VCN * m_b + h_A * m_A)/3600 \quad (2.25)$$

Donde: F_v esta dado en kW/m^3

E_{sum} = energía total suministrada a la cámara en kW.

m_b = masa total de bagazo suministrado (kg).

h_A = entalpia del aire que ingresa al sistema (kJ/kg).

m_A = masa de aire (kg).

** Factor de volumen: se define como la potencia generada por unidad de volumen (kW/m^3).

* Velocidad de ignición: velocidad a la cual ocurre la combustión de un combustible determinado.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se definió completamente al azar una muestra de 5 unidades experimentales de acuerdo al mínimo número estadístico para asegurar repetitividad y exactitud de los datos y hacer un análisis por rango y media; hornillas con cámara Ward con la misma potencia por unidad de volumen, ubicadas en la Hoya del Río Suárez con centro de investigación en E. E. CIMPA a 0,5°36'52" N, 78°36'24" W, con una altura de 1580 m.s.n.m., temperatura media de 22°C, precipitación media anual de 1800 mm y una humedad relativa del 75%. Los trapiches seleccionados fueron: Jorge Grandas (Barbosa), San Sebastián (Vélez), Santa Bárbara (Suaita), San Antonio (Güepsa) y San Vicente (Barbosa).

Este proyecto se desarrolló a través de una investigación experimental cuantitativa, donde la parte experimental se dividió en una fase exploratoria en la cual se fijaron las variables objeto de estudio, se determinaron los puntos de muestreo y calibraron los equipos necesarios para la toma de datos conforme a protocolos diseñados por el CIMPA, y una fase de toma de datos en campo y laboratorio. Para la parte explicativa, se emplearon herramientas computacionales con los programas MicroScan V5 y Excel para analizar y comparar los datos recopilados con los resultados de los modelos matemáticos propuestos. La validación de los resultados se hizo con un análisis de varianza correspondiente a los diseños experimentales propuestos, mediante la prueba estadística F.

3.1. FIJACIÓN DE LAS VARIABLES

Se aplicó un diseño experimental en bloques al azar para evaluar las variables básicas de diseño; volumen de cámara y área de parrilla, cada bloque fue una réplica experimental y correspondía a un trapiche diferente.

Para evaluar las variables de operación, a cada bloque se le aplicó un diseño experimental factorial 3x3, con posiciones de válvula de 30°, 45° y 60°, y periodos de alimentación de 90s, 150s y 210s.

Cada experimento tuvo una duración de 60min, con 30min previos de estabilización de las condiciones de operación de la hornilla. En el proyecto se trabajaron como variables independientes y dependientes:

- Variables independientes: potencia alimentada (kW), periodo de alimentación (s), posición de la válvula de la chimenea, volumen de la cámara de combustión (m^3), área de parrilla (m^2).
- Variables dependientes: temperaturas de la cámara de combustión ($^{\circ}C$), composición de los gases de combustión (fracción volumétrica), potencia generada (kW), material particulado (kg/h), exceso de aire (%).

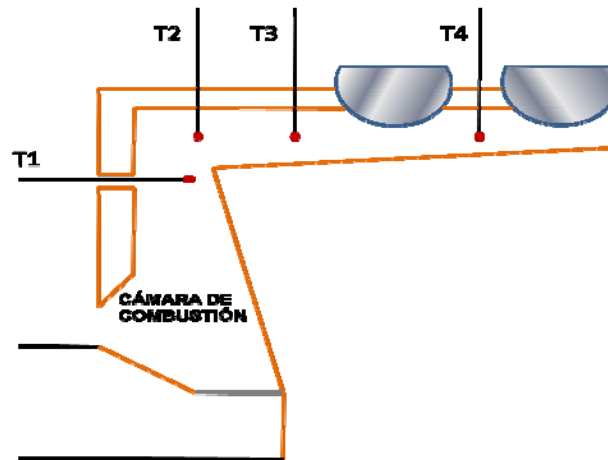
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MONTAJES Y EQUIPOS

Se utilizaron termocuplas tipo K con capacidad hasta 1200 $^{\circ}C$, conectadas al Datalogger para toma de registros cada 30s con reporte de perfiles de temperatura a través del programa MicroScan V5. En la Figura 3, se muestran los puntos de registro T1, T2, T3 y T4.

La cantidad de bagazo alimentado fue dosificado con ayuda de una balanza electrónica. El exceso de aire se varió cambiando la posición la válvula mariposa ubicada en la base de la chimenea.

La cantidad de material particulado (MP) fue recolectado con un sistema diseñado para el proyecto. Consiste en un tubo de acero inoxidable de 0,5pulg y 1m de longitud, perforado cada 1pulg con orificios de 0,5pulg y forrado con una malla de acero inoxidable de hilos trenzados de 200 orificios/pulg². El particulado obtenido después de cada experimento fue recogido y pesado en una balanza analítica.

FIGURA 3. Puntos de medición de temperaturas en la cámara de combustión



Fuente: Autores

El Material particulado, la temperatura y la composición puntual de los gases de chimenea, se midieron a una altura homogénea de 2,2m por encima de la base de la chimenea. Para la toma de composiciones de CO, CO₂, O₂, NO_x, y H₂ de los gases de chimenea se empleó un analizador de gases Testo 350K-L. Se registraron cada 30s durante 5min.

3.3. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

La Figura 4 muestra las entradas y salidas de materia en la cámara de combustión.

Figura 4. Entradas y salidas de materia en la cámara de combustión



3.3.1. Balances de materia

- Balance de carbono (C)

$$(0,47B)/12 = (\gamma_{CO_2} + \gamma_{CO})G + (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP)0,47/12 \quad (3.1)$$

- Balance de hidrógeno (H)

$$(0,065Bs) = 2H_2O_{formada} + (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP)0,065 \quad (3.2)$$

- Balance de oxígeno (O)

$$(0,44Bs)/16 + (2 * 0,21) * A_{real} = (2\gamma_{CO_2} + \gamma_{CO} + 2\gamma_{O_2}) * G + H_2O_{formada} + (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP) * 0,44/16 \quad (3.3)$$

- Fracción de N₂ en los gases de combustión

$$\gamma_{N_2} = 1 - \gamma_{CO_2} - \gamma_{CO} - \gamma_{O_2} \quad (3.4)$$

- Porcentaje de aire en exceso

La composición química del bagazo determinada por el análisis último y las reacciones de combustión permite calcular la cantidad de aire mínima requerida:

$$A_{teórico} = 1/0,209(C/12 + H/4 + O/32)B \quad (3.5)$$

Para el bagazo seco se tiene que:

$$A_{teórico} = 1/0,209(0,47/12 + 0,065/4 + 0,44/32)B$$

$$A_{teórico} = 0,19936B \text{ [kmol/kg]} \quad (3.6)$$

Donde $A_{teórico}$ es el aire mínimo requerido para quemar B kilogramos de bagazo seco.

La cantidad de aire en exceso necesario para completar la combustión se define como:

$$\Lambda_{aire} = ((A_{real} - A_{teórico}) / A_{teórico}) * 100 \quad (3.7)$$

A_{real} = aire real que se le suministra a la cámara en kmol.

3.3.2. Balances de energía

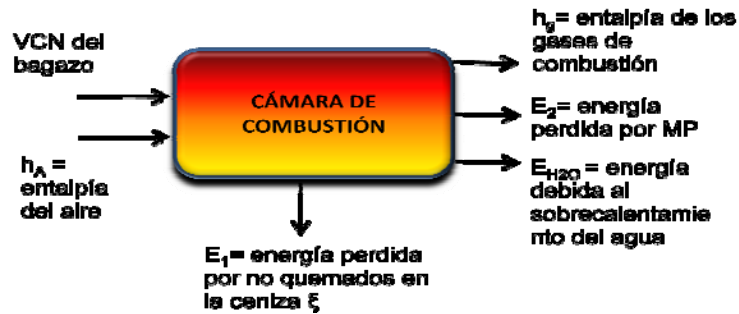
La Figura 5 muestra las entradas y salidas de energía en la cámara de combustión.

El ladrillo refractario con el cual están construidas las cámaras de combustión es altamente poroso y posee un coeficiente de conductividad térmica bajo con valores de 0,00047 a 0,00105 kW/K*m; por lo cual la transferencia de calor por conducción a través de las paredes puede asumirse despreciable. Para efectos de cálculo el sistema puede asumirse como un horno adiabático:

$$0 = \text{VCN} * m_b + h_A * m_A - E_1 - h_g - E_2 - E_{H_2O} \quad (3.8)$$

$$h_A = C_B(T_a - T_0) + H_a \lambda_0 + C_{pA} H_a (T_a - T_0) \quad (3.9)$$

FIGURA 5. Entradas y salidad de energía en la cámara de combustión



Donde:

C_B = calor específico del aire seco (kJ/kg-°C)

T_a = temperaturas de entrada del aire (°C)

C_{pA} = calor específico del agua (kJ/kg-°C)

H_a = humedad absoluta del aire (kg_{H2O}/kg_{AS})

λ_0 = calor latente de evaporación del agua a la temperatura de referencia (kJ/kg)

$$E_1 = \%NQ_1 * \xi * \text{VCN} \quad (3.10)$$

Donde E_1 es el calor perdido por material no quemado en la ceniza ξ y $\%NQ_1$ es porcentaje de no quemados.

$$E_{H_2O} = m_{H_2O} * C_{pA} * (T_{ad} - T_0) \quad (3.11)$$

m_{H_2O} = masa de agua evaporada (kg).

$$E_2 = \%NQ_2 * MP * VCN \quad (3.12)$$

Donde: E_2 es la energía perdida por no quemados en el material particulado MP y $\%NQ_2$ es porcentaje de no quemados en el material particulado.

La eficiencia se define como la energía entregada por el horno en los gases de combustión h_g sobre la energía total suministrada.

$$\eta = \frac{h_g}{VCN+h_A} * 100 \quad (3.13)$$

La potencia desarrollada por la cámara se obtiene por la siguiente expresión:

$$Potencia = h_g/3600 \quad kW \quad (3.14)$$

Donde la potencia está dada en kW.

El parámetro de comparación para el análisis de resultados es la potencia desarrollada por unidad de volumen Pot ; la cual mantiene la similitud con hornillas de diferente tamaño:

$$Pot = \frac{h_g}{V*3600} \quad kW/m^3 \quad (3.15)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos de temperaturas, composición de gases, no quemados en material particulado y cenizas, se analizó para cámaras tipo Ward-CIMPA mediante balances de masa y energía, la potencia desarrollada por la cámara de combustión al variar el periodo de alimentación y el exceso de aire.

Se obtuvieron nuevas correlaciones para calcular el exceso de aire para un rango más amplio de periodos de alimentación; ya que los parámetros de la expresión existente estaban restringidos para un solo periodo de alimentación. También se obtuvo una correlación para calcular las pérdidas por material particulado en función del exceso de aire. Estas nuevas correlaciones se usaron para ajustar el modelo matemático de combustión propuesto en el 2004.

Mediante un análisis de varianza utilizando el estadístico de prueba F, se analizó la eficacia de los modelos matemáticos de combustión ajustados, para describir el fenómeno termodinámico y determinar las variables básicas de diseño volumen de cámara y área de parrilla, relacionadas directamente con las variables de operación.

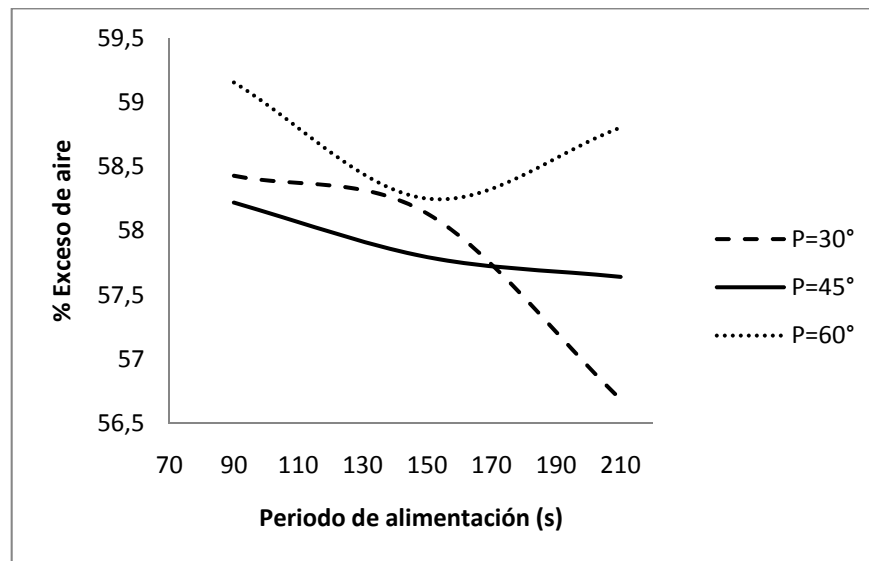
4.1. VARIACIÓN DEL EXCESO DE AIRE CON EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN Y LA POSICIÓN DE LA VÁLVULA

Se encontró que el exceso de aire disminuye con periodos de alimentación de 150s y 210s en las posiciones de válvula de 30° y 45° que corresponde a entradas de aire de 0,311 y 0,313 kmol_{aire}/kg_{bagazo seco} respectivamente como se muestra en la Figura 6. La tendencia observada obedece a que la succión de aire generada por la chimenea es baja y la descarga de la cámara de combustión es lenta al aumentar el periodo de alimentación; acumulando de esta manera el bagazo en

combustión y reduciendo el área libre de parrilla por donde entra el aire para penetrar en el lecho.

En la posición de válvula de 60°, se observa un mínimo de 58% de aire en exceso que corresponde a $0,315 \text{ kmol}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{bagazo seco}}$ a periodos de alimentación de 150s, el aumento observado a periodos superiores, indica que la combustión se lleva a cabo en un menor tiempo y el flujo de aire a través del lecho en combustión se favorece debido a que existe mayor área libre de parrilla por donde circular.

FIGURA 6. Exceso de aire vs periodo de alimentación



Las correlaciones encontradas para el porcentaje de exceso de aire (Λ_{aire}) en función del periodo de alimentación f a posiciones de válvula de 30°, 45° y 60°, con un $R^2=1$, corresponden respectivamente a:

$$\Lambda_{\text{aire}} = -0,00016f^2 + 0,03372f + 56,87859 \quad (4.1)$$

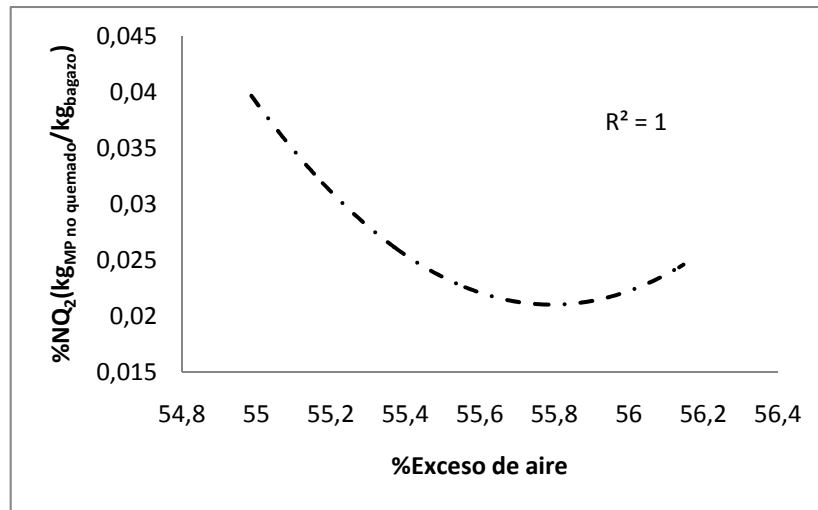
$$\Lambda_{\text{aire}} = 0,00004f^2 - 0,01573f + 59,50822 \quad (4.2)$$

$$\Lambda_{\text{aire}} = 0,0002f^2 - 0,0628f + 63,3541 \quad (4.3)$$

4.2. ESTUDIO DE LA CANTIDAD DE NO QUEMADOS EN EL MATERIAL PARTICULADO

En la Figura 7 se muestra el comportamiento del material particulado no quemado con el exceso de aire. Se observó un máximo de material particulado no quemado a excesos de aire promedio de 55%, debido a que el aire no es suficiente para completar la combustión. Los valores mínimos se encuentran a valores cercanos al 56%, excesos de aire superiores a este valor aumentan la cantidad de material particulado por efecto del arrastre generado al aumentar el caudal de aire que ingresa a la cámara de combustión por el área libre de parrilla.

FIGURA 7. Porcentaje de no quemados en material particulado vs exceso de aire



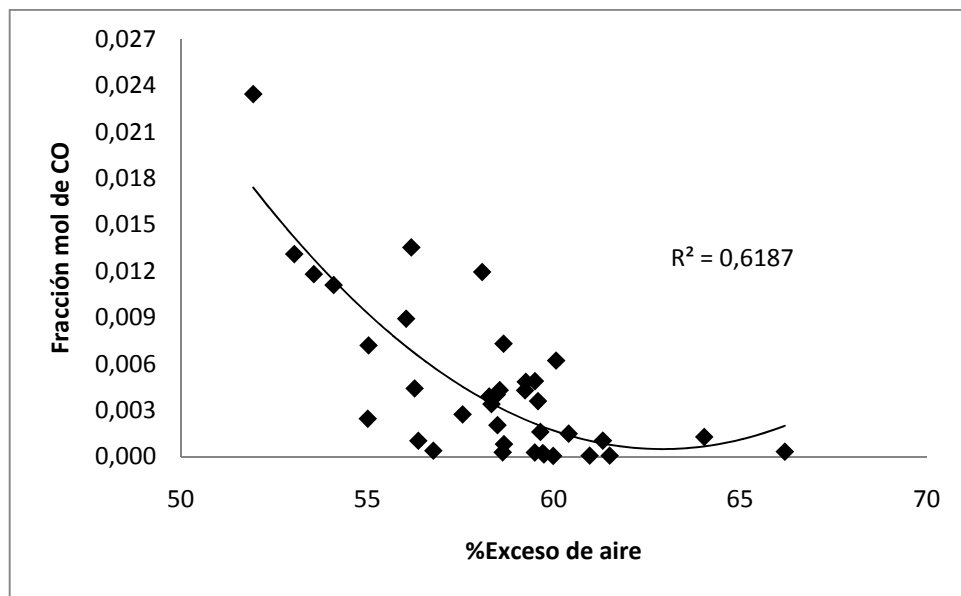
$$\%NQ_2 = 0,02771 * \Lambda_{\text{aire}}^2 - 3,2037 * \Lambda_{\text{aire}} + 89,39511 \quad (4.4)$$

Donde % NQ₂ está dado en kg_{MP} no quemado/kg_{bagazo} seco

4.3. ESTUDIO DE LA FORMACION DE CO

En la Figura 8 se muestra la fracción mol de CO con el exceso de aire. Se observó que con excesos de aire inferiores al 57% aumenta notoriamente el CO de 0,001 a 0,023 fracción mol en base seca. Los valores mínimos obtenidos de CO se reportan con excesos de aire entre el 58% al 61% que corresponde a entradas de 0,315 a 0,321 kmol_{aire}/kg_{bagazo seco} favoreciendo las etapas de combustión del bagazo y reduciendo en promedio la formación de CO de 0,0049 a 0,0038 fracción mol en base seca.

FIGURA 8. Fracción de CO vs exceso de aire

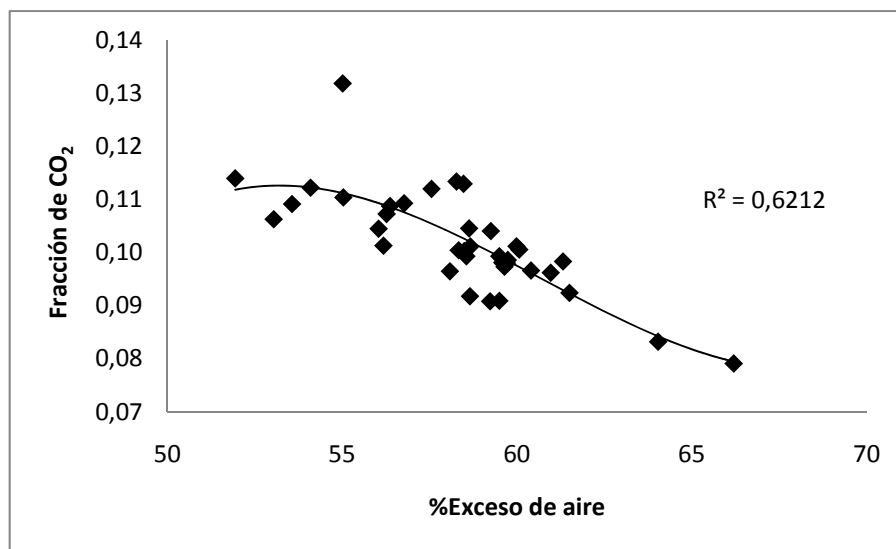


$$\text{Fracción CO} = 0,0001\Lambda_{\text{aire}}^2 - 0,0177\Lambda_{\text{aire}} + 0,5565 \quad (4.5)$$

4.4. ESTUDIO DE LA FORMACION DE CO₂

En la Figura 9 se muestra la formación de CO₂ en función del exceso de aire. Se encontró una formación de CO₂ promedio de 0,095 fracción mol con excesos de aire entre 58% a 61%. A excesos de aire mayores la formación de CO₂ tiende a disminuir hasta valores de 0,08 fracción mol.

FIGURA 9. Fracción de CO₂ vs exceso de aire



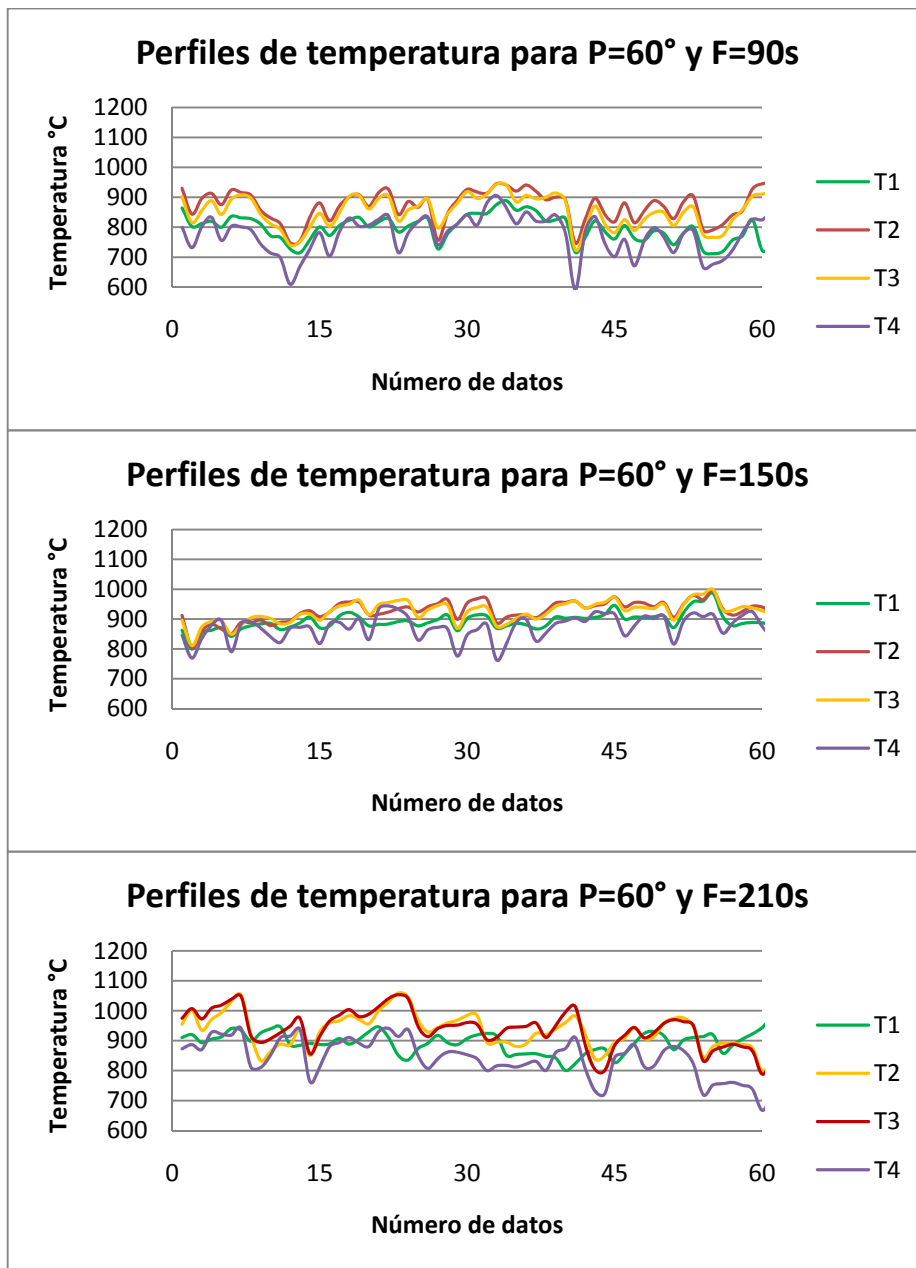
$$\text{Fracción CO} = 0,00005\Lambda_{\text{aire}}^3 - 0,003\Lambda_{\text{aire}}^2 + 0,229\Lambda_{\text{aire}} - 4,396 \quad (4.6)$$

4.5. PERFILES DE TEMPERATURA

Se observó la estabilidad de las temperaturas y el comportamiento oscilatorio semejante de los puntos de temperatura registrados, este comportamiento se debe a que el proceso es por lotes; cuando se carga la cámara de combustión la temperatura disminuye mientras empieza la combustión del bagazo, después de un tiempo la temperatura alcanza su punto máximo y luego disminuye con la descarga de la cámara. En la Figura 10 se muestran los perfiles de temperatura a

diferentes condiciones de operación para una de las cámaras de combustión. Las demás cámaras de combustión evaluadas mantienen la misma tendencia.

FIGURA 10. Temperatura vs tiempo



La duración de cada oscilación depende del periodo de alimentación al cual está operando la cámara. Para periodos de 90s el número de oscilaciones es en promedio de 17 oscilaciones por cada 60 registros de temperatura tomados cada 30s, para periodos de 150s y 210s se presentan en promedio 12 y 9 oscilaciones respectivamente.

Se encontró que cuando el número de oscilaciones aumenta, la desviación del valor de temperatura media se reduce, sin embargo; para periodos de alimentación de 90s la temperatura promedio se ve reducida debido a que la carga de bagazo es pequeña y la combustión se lleva a cabo muy rápido, descargando el horno y disipándose el calor con el flujo de aire.

Las condiciones más estables con temperaturas promedio superiores a 900°C, se observaron a periodos de alimentación de 150s y excesos de aire superiores al 58%.

4.6. ESTUDIO DE LA POTENCIA DESARROLLADA CON EL EXCESO DE AIRE

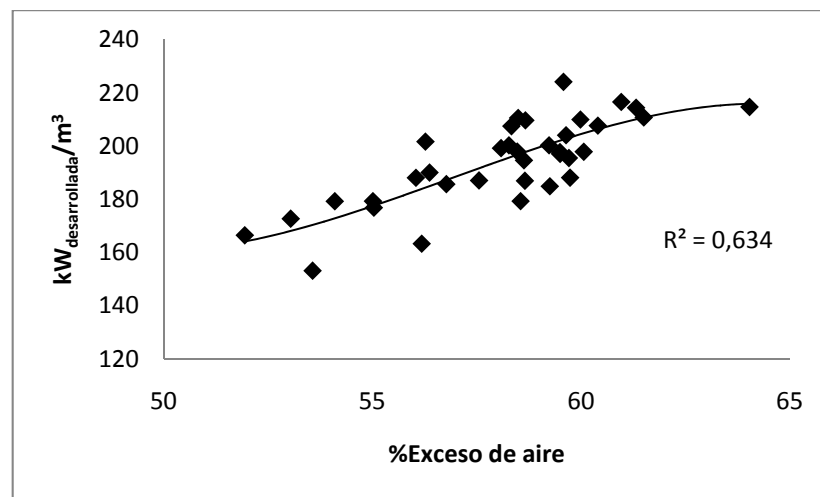
Para una cámara de combustión que se puede asumir adiabática, la potencia desarrollada se puede obtener de forma indirecta con el poder calorífico del combustible, la temperatura y la composición de los gases de combustión. El flujo de gases a la salida puede variar de forma significativa debido a que el mayor caudal lo representa el aire que ingresa al sistema. Debido a esto, el exceso de aire puede tener un efecto positivo o negativo en la eficiencia de la cámara de combustión.

Se observo que con excesos inferiores al 56% no se garantiza el aire suficiente para completar las etapas de combustión reduciendo la potencia hasta en 70kW/m³, de la misma manera cuando el exceso de aire es superior a 61% el calor demandado para el precalentamiento del aire entrante aumenta y hay un enfriamiento del sistema por convección.

Se encontró que con excesos de aire entre 58% y 61% se tienen mejores resultados en términos de potencia, con potencias entre $200\text{kW}/\text{m}^3$ y $220\text{kW}/\text{m}^3$. En la Figura 11 se muestra la variación de la potencia desarrollada con el exceso de aire.

La correlación obtenida para la potencia/volumen de la cámara en función del exceso de aire, corresponde a:

FIGURA 11. Potencia desarrollada/volumen vs exceso de aire



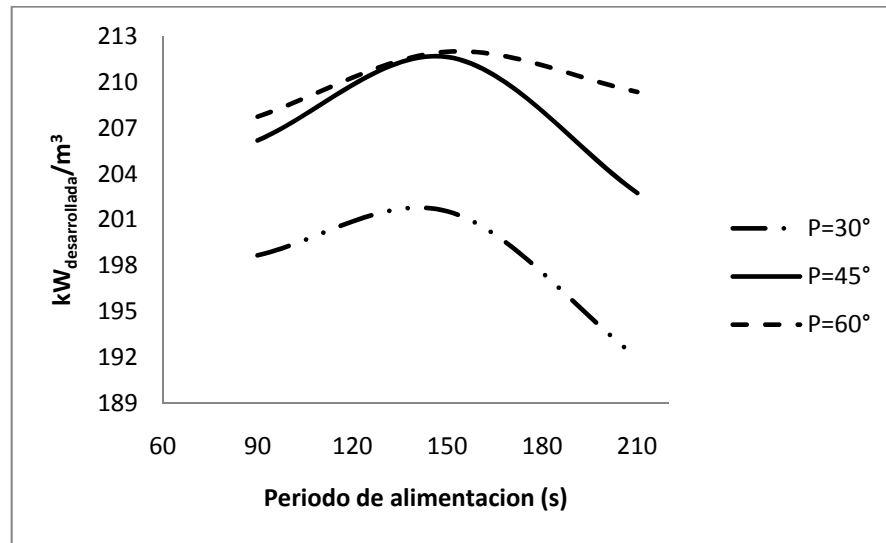
$$\text{Pot} = -0,0346\Lambda_{\text{aire}}^3 + 5,9312\Lambda_{\text{aire}}^2 - 331,95\Lambda_{\text{aire}} + 6271,2 \quad (4.7)$$

4.7. ESTUDIO DE LA POTENCIA DESARROLLADA CON EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN

Se presenta la misma tendencia para cada una las curvas graficadas que corresponden a las tres posiciones de válvula evaluadas como se muestra en la Figura 12. Los mejores valores de potencia desarrollada/volumen se encuentran a un periodo de alimentación de 150s.

El valor máximo se obtiene para un periodo de alimentación de 150s y una posición de válvula de 60°, reportando valores de 212kW/m³ en promedio.

FIGURA 12. Potencia desarrollada/volumen vs periodo de alimentación



Las correlaciones encontradas para la potencia en función del periodo de alimentación a posiciones de válvula de 30°, 45° y 60°, con un R²=1, corresponden respectivamente a

$$\text{Pot} = -0,001f^2 + 0,300f + 188,459 \quad (4.8)$$

$$\text{Pot} = -0,002f + 0,569f + 171,091 \quad (4.9)$$

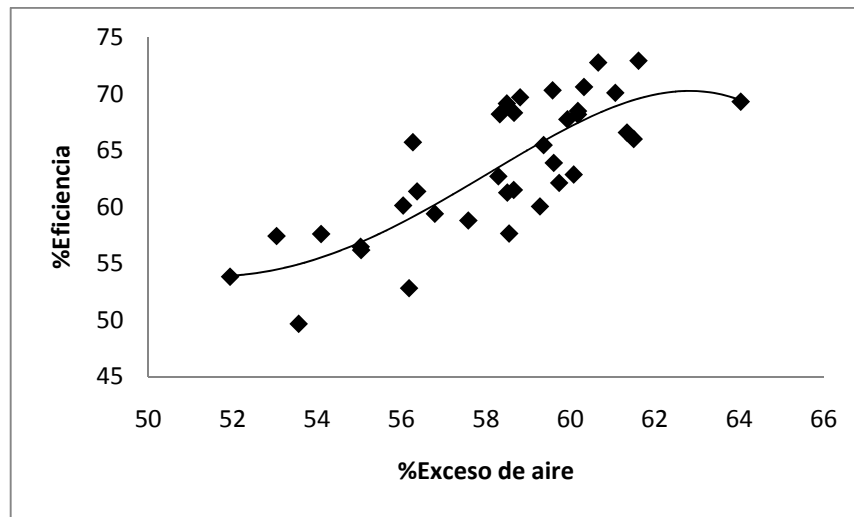
$$\text{Pot} = -0,002f^2 + 0,463f + 171,030 \quad (4.10)$$

4.8. ESTUDIO DE LA EFICIENCIA CON EL EXCESO DE AIRE

En la Figura 13 se muestra la variación de la eficiencia en función del exceso de aire.

Se observó que con excesos de aire inferiores al 58% hasta 52% la eficiencia se puede ver afectada hasta en un 10%. Con excesos de aire entre 58% a 62% las eficiencias alcanzan valores hasta de 73%.

FIGURA 13. Eficiencia vs exceso de aire



Se encontró que la eficiencia de las cámaras de combustión varían en función del exceso de aire según:

$$\eta = -0,0011\Lambda_{\text{aire}}^4 + 0,2214\Lambda_{\text{aire}}^3 - 16,997\Lambda_{\text{aire}}^2 + 571,6\Lambda_{\text{aire}} - 7044,8 \quad (4.11)$$

4.9. COMPARACIÓN DE LOS DATOS REALES Y LOS SIMULADOS CON LOS MODELOS MATEMÁTICOS PROPUESTOS

De los modelos de combustión se obtiene la potencia desarrollada por la cámara, la temperatura adiabática, la composición de los gases de combustión y las variables básicas de diseño volumen de cámara y área de parrilla, a partir de datos de entrada: carga alimentada $Q(\text{kg/h})$, periodo de alimentación $f(\text{s})$ y exceso de aire que se manipula con la posición de la válvula P .

4.9.1. Comparación energética de los datos reales con los simulados

En el Cuadro 1 se muestran los resultados reales y simulados obtenidos para la temperatura, potencia, eficiencia y los parámetros de diseño volumen de cámara y área de parrilla, junto con los errores relativos correspondientes.

Se encontró que en los datos reales existen variaciones en la potencia desarrollada por unidad de volumen de cámara a las mismas condiciones de operación, esto debido al estado físico de las diferentes hornillas y a variables de ruido que no se pudieron controlar, como la extracción del molino que determina el tamaño y la humedad del bagazo, la variedad de caña utilizada y la velocidad y temperatura del viento.

Los resultados obtenidos en la simulación no presentan variaciones tan marcadas ya que muchas de las variables de ruido no se tienen en cuenta y se asumen condiciones más estables. Se encontraron errores relativos promedio correspondientes a 1,7% para la potencia, y de 9,4% para las eficiencias respecto a los resultados reales; lo cual indica una buena aproximación de los modelos.

4.10. ANÁLISIS DE VARIANZA

4.10.1. Comparación de las variables básicas de diseño de las cámaras de combustión.

El fin de los modelos matemáticos propuestos es el diseño de las cámaras de combustión por medio de sus variables básicas volumen de cámara y área de parrilla, para ello se tuvieron en cuenta las medidas reales de las cámaras evaluadas y se ajustaron los modelos para luego simular el fenómeno y comparar los resultados.

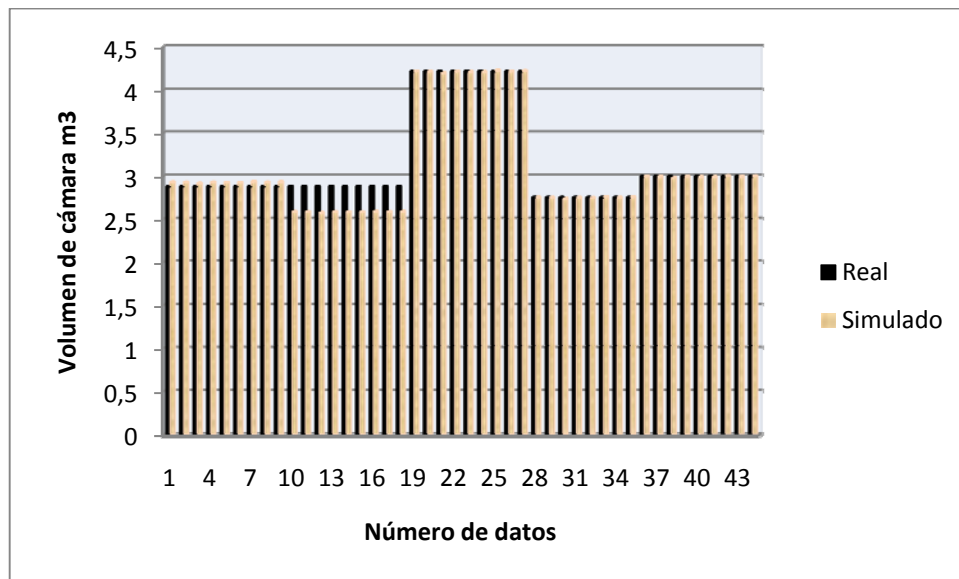
CUADRO 1. Resultados reales y simulados

Experimento			T _{ad} (°C)		Potencia entregada/m ³			Eficiencia %			Volumen cámara (m ³)			Área de parrilla (m ²)		
Q (kg/h)	P	F (s)	Real	Simulado	Real	Simulado	%Error	Real	Simulado	%Error	Real	Simulado	%Error	Real	Simulado	%Error
Hornilla 1 402	30°	90	914	1145	186	202	9,0	59,2	65,6	10,7	2,89	2,93	1,30	1,05	1,03	1,60
		150	911	1146	195	203	4,0	61,8	65,6	6,1	2,89	2,93	1,23	1,05	1,03	1,61
		210	922	1153	179	203	13,4	57,4	65,6	14,3	2,89	2,91	0,83	1,05	1,03	1,69
	45°	90	896	1146	198	202	2,3	62,6	65,6	4,7	2,89	2,93	1,25	1,05	1,03	1,61
		150	920	1148	214	203	5,5	67,6	65,6	3,0	2,89	2,92	1,15	1,05	1,03	1,63
		210	906	1148	187	203	8,3	59,5	65,6	10,1	2,89	2,92	1,12	1,05	1,03	1,63
	60°	90	872	1142	185	202	9,2	58,6	65,5	11,8	2,89	2,93	1,50	1,05	1,03	1,56
		150	923	1146	198	202	2,3	62,9	65,6	4,3	2,89	2,93	1,25	1,05	1,03	1,61
		210	934	1143	200	202	0,9	63,6	65,5	2,9	2,89	2,93	1,41	1,05	1,03	1,58
Hornilla 2 403,3	30°	90	916	1087	187	206	10,0	63,8	68,1	6,7	2,69	2,59	3,76	1,05	0,89	14,97
		150	945	1088	200	206	2,8	68,3	68,2	0,2	2,69	2,58	3,83	1,05	0,89	14,98
		210	932	1094	197	207	4,8	67,2	68,2	1,5	2,69	2,57	4,19	1,05	0,89	15,05
	45°	90	946	1088	208	206	0,9	70,6	68,2	3,4	2,69	2,58	3,81	1,05	0,89	14,98
		150	933	1090	198	206	4,2	67,4	68,2	1,1	2,69	2,58	3,90	1,05	0,89	15,00
		210	949	1090	204	206	1,0	69,5	68,2	1,9	2,69	2,58	3,92	1,05	0,89	15,00
	60°	90	962	1084	199	205	3,1	68,1	68,1	0,0	2,69	2,59	3,58	1,05	0,89	14,93
		150	960	1088	210	206	2,0	71,5	68,2	4,6	2,69	2,58	3,80	1,05	0,89	14,98
		210	961	1086	217	206	5,1	73,5	68,1	7,3	2,69	2,59	3,66	1,05	0,89	14,95
Hornilla 3 564,5	30°	90	873	1156	179	202	12,5	57,4	65,1	13,4	4,21	4,22	0,08	1,50	1,49	0,35
		150	860	1157	163	202	23,7	52,5	65,1	23,9	4,21	4,21	0,00	1,50	1,49	0,37
		210	865	1163	153	203	32,4	49,5	65,1	31,5	4,21	4,20	0,39	1,50	1,49	0,45
	45°	90	941	1157	188	202	7,3	60,5	65,1	7,5	4,21	4,21	0,03	1,50	1,49	0,36

		150	944	1158	179	202	12,7	57,9	65,1	12,4	4,21	4,21	0,08	1,50	1,49	0,38
		210	921	1159	177	202	14,3	57,0	65,1	14,1	4,21	4,21	0,10	1,50	1,49	0,39
	60°	90	988	1153	224	201	10,2	71,6	65,1	9,0	4,21	4,22	0,27	1,50	1,50	0,31
		150	938	1157	173	202	16,9	55,9	65,1	16,4	4,21	4,21	0,03	1,50	1,49	0,36
		210	934	1154	166	202	21,1	54,0	65,1	20,5	4,21	4,22	0,18	1,50	1,50	0,33
Hornilla 4 427	30°	90	843	1090	253	206	18,8	85,3	68,0	20,2	2,96	2,75	7,03	1,10	0,95	13,56
		150	895	1091	239	206	13,8	81,8	68,0	16,8	2,96	2,75	7,10	1,10	0,95	13,57
		210	893	1097	221	207	6,4	76,2	68,1	10,6	2,96	2,74	7,45	1,10	0,95	13,64
	45°	90	877	1090	247	206	16,8	84,1	68,0	19,0	2,96	2,75	7,08	1,10	0,95	13,57
		150	870	1092	265	206	22,3	89,3	68,1	23,7	2,96	2,75	7,17	1,10	0,95	13,58
		210	855	1092	238	206	13,5	81,0	68,1	15,9	2,96	2,75	7,19	1,10	0,95	13,59
	60°	90	846	1087	235	205	12,6	79,8	68,0	14,8	2,96	2,76	6,86	1,10	0,95	13,52
		150	843	1090	264	206	22,1	88,5	68,0	23,0	2,96	2,75	7,08	1,10	0,95	13,57
		210	910	1088	263	205	22,0	89,5	68,0	24,0	2,96	2,75	6,94	1,10	0,95	13,54
Hornilla 5 428,9	30°	90	884	1127	188	203	8,1	61,2	66,4	8,4	3,02	3,00	0,65	1,10	1,05	4,60
		150	971	1128	211	204	3,4	68,7	66,4	3,3	3,02	2,99	0,73	1,10	1,05	4,62
		210	965	1134	210	204	2,6	68,4	66,4	2,8	3,02	2,98	1,11	1,10	1,05	4,70
	45°	90	945	1128	190	203	7,0	62,3	66,4	6,5	3,02	2,99	0,70	1,10	1,05	4,61
		150	983	1129	202	204	1,0	66,1	66,4	0,4	3,02	2,99	0,80	1,10	1,05	4,63
		210	965	1130	208	204	1,8	67,7	66,4	1,9	3,02	2,99	0,83	1,10	1,05	4,64
	60°	90	906	1124	196	203	3,8	63,6	66,3	4,3	3,02	3,00	0,46	1,10	1,05	4,56
		150	918	1128	211	203	3,5	68,2	66,4	2,7	3,02	2,99	0,70	1,10	1,05	4,61
		210	882	1125	215	203	5,4	69,0	66,4	3,8	3,02	3,00	0,55	1,10	1,05	4,58

En la Figura 14 se muestra un diagrama de barras para comparar el volumen de las cámaras real y el obtenido por simulación.

FIGURA 14. Comparación del volumen de cámara real y simulado



Se observó que los valores obtenidos por el simulador se mantienen cercanos a los valores reales para cada una de las cámaras. Se encontró un error relativo promedio de 2,6% entre los datos reales y los predichos por los modelos matemáticos de combustión.

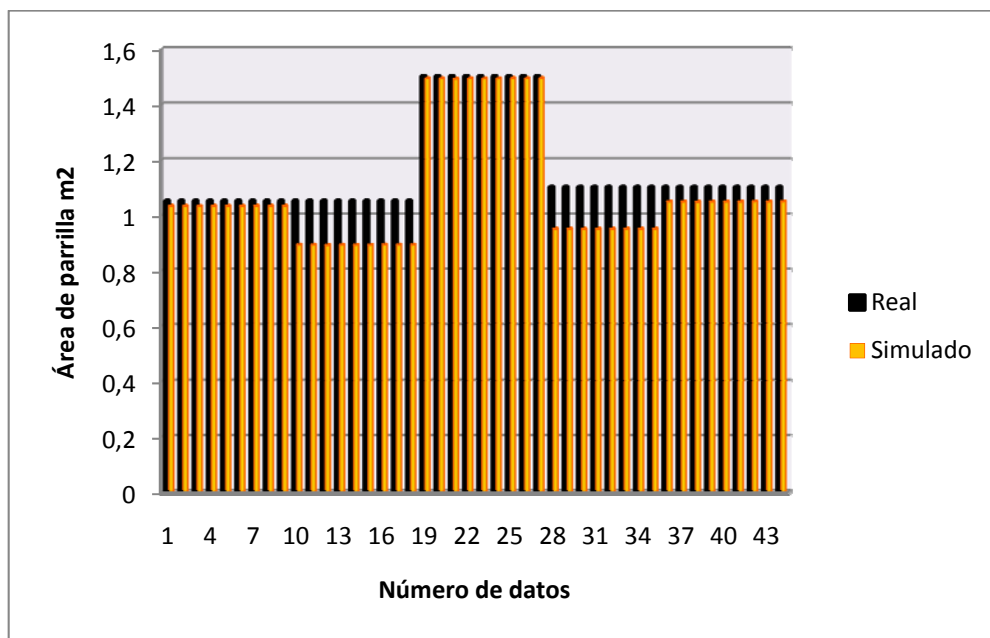
El resumen del análisis de varianza aplicando la prueba estadística F a un nivel de confianza de 95% mostrado en la Tabla 1, indica que no existe una varianza significativa entre los valores del volumen real y simulado ya que el estadístico de prueba $F < F_{\text{crítico}}$.

TABLA 1. Resumen del análisis de varianza para el volumen de cámara real y simulado

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,121	1	0,121	3,13	0,08	3,95
Dentro de los grupos	3,341	86	0,039			
Total	3,462	87				

Un análisis similar al del volumen de cámara, muestra que para el área de parrilla los valores predichos siguen siendo satisfactorios, manteniéndose valores cercanos a los reales como se muestra en el diagrama de barras de la Figura 15. El error relativo encontrado para el área de parrilla predicha por los modelos respecto a los valores reales fue de 2,6%.

FIGURA 15. Comparación del área de parrilla real y simulada



El análisis de varianza muestra que el estadístico de prueba $F < F_{\text{crítico}}$, como se observa en la Tabla 2, por lo tanto no existe varianza significativa entre el área de parrilla real y calculada.

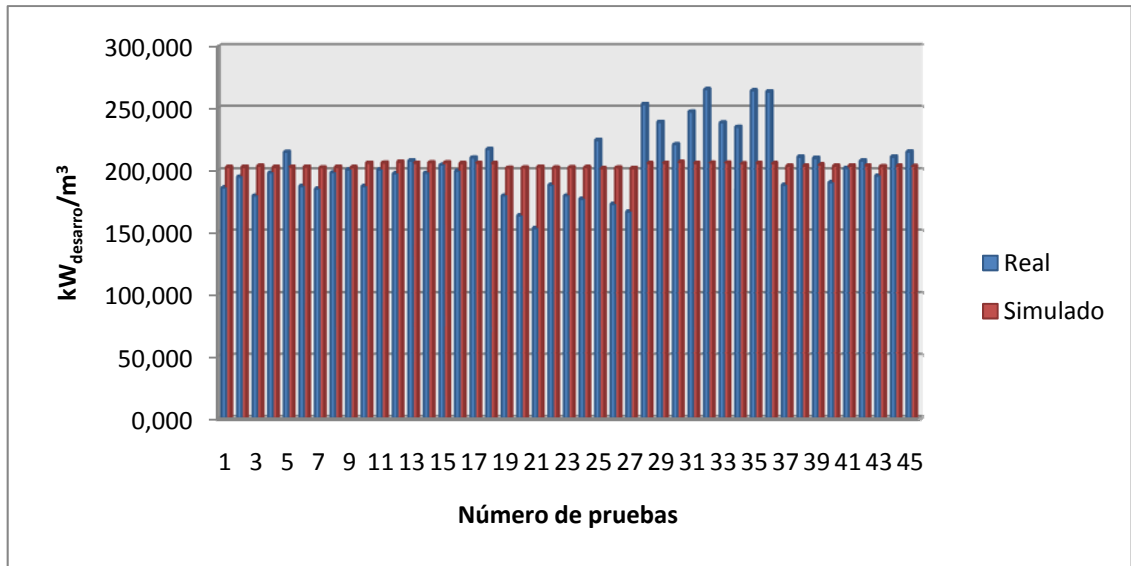
TABLA 2. Resumen del análisis de varianza para el área de parrilla real y simulada

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,121	1	0,121	3,13	0,08	3,95
Dentro de los grupos	3,341	86	0,039			
Total	3,462	87				

4.10.2. Comparación de la potencia/volumen desarrollada por la cámara

En la Figura 16 se muestra un diagrama de barras que representa la varianza para la relación $\text{kW}_{\text{desarro}}/\text{m}^3$, real y simulada; cuya obtención tiene en cuenta los parámetros de diseño y operación. Se observa como los datos calculados caen en valores cercanos a los reales y su comportamiento es más estable, la variabilidad notoria en los datos reales se debe a variables de ruido que no se pudieron controlar durante la experimentación, como: la velocidad del aire, el tamaño y humedad del bagazo, la variedad de la caña y el estado físico de la hornillas que presentan grietas por donde se pierde calor por convección.

FIGURA 16. Comparación de potencia real y la potencia simulada



La Tabla 3 muestra el resumen del análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%. El análisis de varianza se realizó comparando los resultados reales con los simulados experimento a experimento (filas) y los experimentos totales (columnas).

TABLA 3. Resumen del análisis de varianza para las potencias/m³ reales y simuladas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	16860,549	44	383,194	1,167	0,305	1,651
Columnas	20,370	1	20,370	0,062	0,804	4,062
Error	14443,520	44	328,262			
Total	31324,439	89				

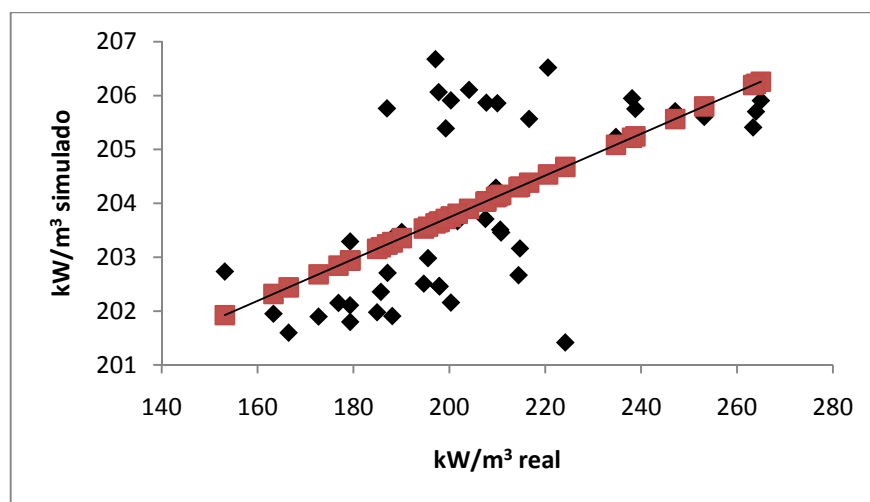
Puesto que $F_{\text{calculada}} < F_{\text{crítico}}$ tanto para filas como para columnas y las probabilidades son mayores que $\alpha/2=0,025$, no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 que dice que no existe varianza entre los datos reales y los predichos por los modelos. Bajo estas condiciones se acepta H_0 con un nivel de confianza del 95%.

4.11. CORRELACIÓN DE LOS DATOS REALES Y SIMULADOS

Se tomó la potencia por unidad de volumen (kW/m^3) como el indicativo que representa indirectamente las variables de operación y diseño, para comparar los datos reales y simulados mediante una regresión lineal con prueba de hipótesis para la significancia de los parámetros de la regresión a un nivel de confianza del 95%.

En la Figura 17 puede apreciarse el comportamiento de los resultados simulados con los reales. La dispersión observada se debe principalmente a las modificaciones hechas para la experimentación y a variaciones por efectos de las variables de ruido.

FIGURA 17. Curva de regresión ajustada para la potencia simulada vs potencia real



El resumen estadístico de la regresión se muestra en la Tabla 4.

TABLA 4. Estadística de la regresión para las potencias real y simulada

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,611
Coefficiente de determinación R ²	0,373
R ² ajustado	0,358
Error típico	1,35
Observaciones	45

El coeficiente de correlación R², indica que sólo el 37,8% de los datos obedecen un comportamiento lineal, con un error típico de 1,35. Los parámetros de la regresión y su análisis de varianza se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5. Análisis de varianza y parámetros de la regresión

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	47	46,84	25,5731	8E-06
Residuos	43	79	1,83		
Total	44	125,61			
	Coefficientes	Error típico			
Intercepción	196,98	1,58			
Variable X 1	3,87E-02	7,6E-03			

Puesto que el estadístico de prueba $F < F_{\text{crítico}}$, se encuentra que los parámetros de la regresión son significativos.

5. CONCLUSIONES

Al validar los modelos matemáticos definidos en el 2004 para el diseño de cámaras de combustión Ward-CIMPA para hornillas paneleras, se comprobó que los parámetros de diseño se ajustan al de las cámaras existentes, pero los de operación no se ajustan al diseño de las cámaras; puesto que afectan negativamente las eficiencias en un 4% y no son prácticos para los operarios.

Al evaluar la muestra representativa de hornillas paneleras comerciales con cámara Ward-CIMPA, se determinó con un nivel de confianza del 95%, que no existe una varianza significativa entre los valores reales y los predichos por los modelos matemáticos de combustión para los parámetros básicos de diseño. Los errores relativos promedio encontrados fueron de 2,60% para el volumen de la cámara y 7% para el área de parrilla.

Se demostró que los parámetros de operación propuestos en el modelo del 2004, no ofrecen las mejores condiciones de operación para las hornillas comerciales Ward-CIMPA. Los nuevos parámetros de operación ajustados a través de la presente investigación, que proporcionan mejoras en la eficiencia de la cámara en un 4% en promedio son: periodo de alimentación de 150s que facilita el desempeño del operario y posición de válvula de 60° que permite excesos de aire entre 58% a 61% que se logran con la entrada de $0,315$ a $0,321 \text{ kmol}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{bagazo seco}}$.

Se desarrolló una nueva hoja de cálculo en Excel en la cual se obtienen diseños de cámaras Ward-CIMPA con mejoras en la eficiencia hasta de 6.8% y ajustados

a las condiciones de reales de operación factibles en campo, mediante el mejoramiento de el modelo de combustión propuesto.

Se propusieron para el ajuste de los modelos propuestos por CORPOICA-UIS, tres nuevas correlaciones para el exceso de aire en función del periodo de alimentación y una para pérdidas energéticas por material particulado no quemado en función del exceso de aire; las cuales permiten ampliar el rango de aplicación para periodos de alimentación de 90s a 210s y excesos de aire entre 52% a 63%.

Con un nivel de confianza del 95% y un error típico de 1,35, se determinó que no existe una varianza significativa entre, los resultados de las cinco repeticiones de cada uno de los experimentos realizados en campo y entre los datos reales y los obtenidos por simulación en términos de potencia desarrollada en las cámaras.

6. RECOMENDACIONES

Con extracciones en el molino de 58% a 62% se puede obtener un bagazo adecuado para el diseño de las cámaras de combustión Ward-CIMPA propuesto, de tal forma que se favorece la combustión y el desempeño eficiente de la cámara.

Cuando se presentan extracciones menores al 58% por condiciones del molino, se recomienda utilizar una mezcla de bagazo húmedo y bagazo seco para mejorar la eficiencia de la cámara Ward-CIMPA.

Se recomienda estudiar la influencia del exceso de aire que entra por la puerta de alimentación sobre la potencia desarrollada por la cámara.

Ajustar la válvula mariposa a 60° donde la succión generada por la chimenea permite una entrada de aire con un exceso entre 58 a 61% que proporciona una entrada de $0,315$ a $0,321 \text{ kmol}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{bagazo seco}}$ para obtener las mejores condiciones de la combustión del bagazo.

Estudiar el diseño e implementación de un sistema automatizado de alimentación continua de bagazo a la cámara y un sistema de control de temperatura para optimizar e industrializar el proceso disminuyendo los costos de producción.

7. BIBLIOGRAFIA

BENITEZ P., Eduardo. Evaluación comparativa de la cantidad de material particulado emitido por la chimenea y las condiciones de proceso en dos tipos de hornillas tradicional mejorada y Ward-CIMPA. Barrancabermeja, 2001. Trabajo de grado. Instituto Universitario de la Paz. Facultad de Ingeniería Agroindustrial.

BOX, George E.; HUNTER, William; HUNTER, J. Stuart. Estadística para investigadores. Editorial Reverté. España, 1993.

CASTELLANOS C., Henry. Avances en el cultivo de caña y elaboración de panela (tercera edición). Barbosa (Santander), Agosto de 1988.

CONTRERAS F., Carlos Humberto; GARCIA N., Rafael Manuel. SEPULVEDA S., Wilmer. Seminario de Investigación Avanzada. Bucaramanga, 2003.

DI BLASI., Colomba. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. En: journal Progress in Energy and Combustion Science. Vol 35 (2009); p.121–140.

DÍAZ, Rodrigo. Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador, 2008. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica.

GARCIA, Hugo y GORDILLO, Gerardo. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa, 1992. 90 p.

GARCIA B., Hugo R; ALBARRACIN C., Luis C., TOSCANO L., Adriana, SANTANA M., Natalia J., INSUASTY B., Orlando. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. Tibaitatá, 2007.

GARCÍA B., Hugo R. Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas paneleras de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de Panela en Colombia, Proyecto CONVOCATORIA NACIONAL I+D SECTOR AGROPECUARIO 2007.

HERNÁNDEZ A., Leonel A. Determinación de los parámetros de desempeño para la combustión del bagazo en las hornillas paneleras con cámaras Ward-CIMPA. Bucaramanga, 1999. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

HERNÁNDEZ S., Roberto; FERNÁNDEZ C., Carlos y BAPTISTA L., Pilar. Metodología de la investigación (tercera edición), McGraw-Hill. México, 2003.

HOLMAN, J. P. Transferencia de Calor. Compañía Editorial Continental S.A., México, 1995.

HUGOT, E., Manual para ingenieros azucareros, Cia. Editorial continental, S.A., México 1992.

MAHECHA B., Cesar A. Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño de hornillas paneleras. Barbosa, 1991. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

MERENCIO, Deny; GIRALDO, Gregorio. Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill. México, 2004.

MORENO P., Fernando y ROJAS L., Nelson P. Consideraciones de diseño en hornillas paneleras. Compendio No 42, Agosto de 1981.

MUNIR., S. DAOOD., S.S. NIMMO., W. CUNLIFFE., A.M. GIBBS., B.M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. En: journal Bioresource Technology. Vol 100 (October. 2008); p. 1413–1418.

MURPHY, Regina M. Introducción a los procesos químicos principios, análisis y síntesis. McGraw-Hill. México, 2007. 687 p.

OCÓN G., Joaquín. La utilización eficiente de los combustibles. Primera edición. Aguilar, S.A. de ediciones. Madrid, 1964.

PRADA F., Luz E. Buenas prácticas de manufactura en la elaboración de miel y panela, Corpoica-CIMPA. Barbosa, 2001.

RAMAJO-ESCALERA., B. ESPINA., A. GARCÍA., J.R. SOSA-ARNAO., J.H. NEBRA., S.A. Model-free kinetics applied to sugarcane bagasse combustion. En: *Thermochimica Acta* 448 (2006); p. 111–116.

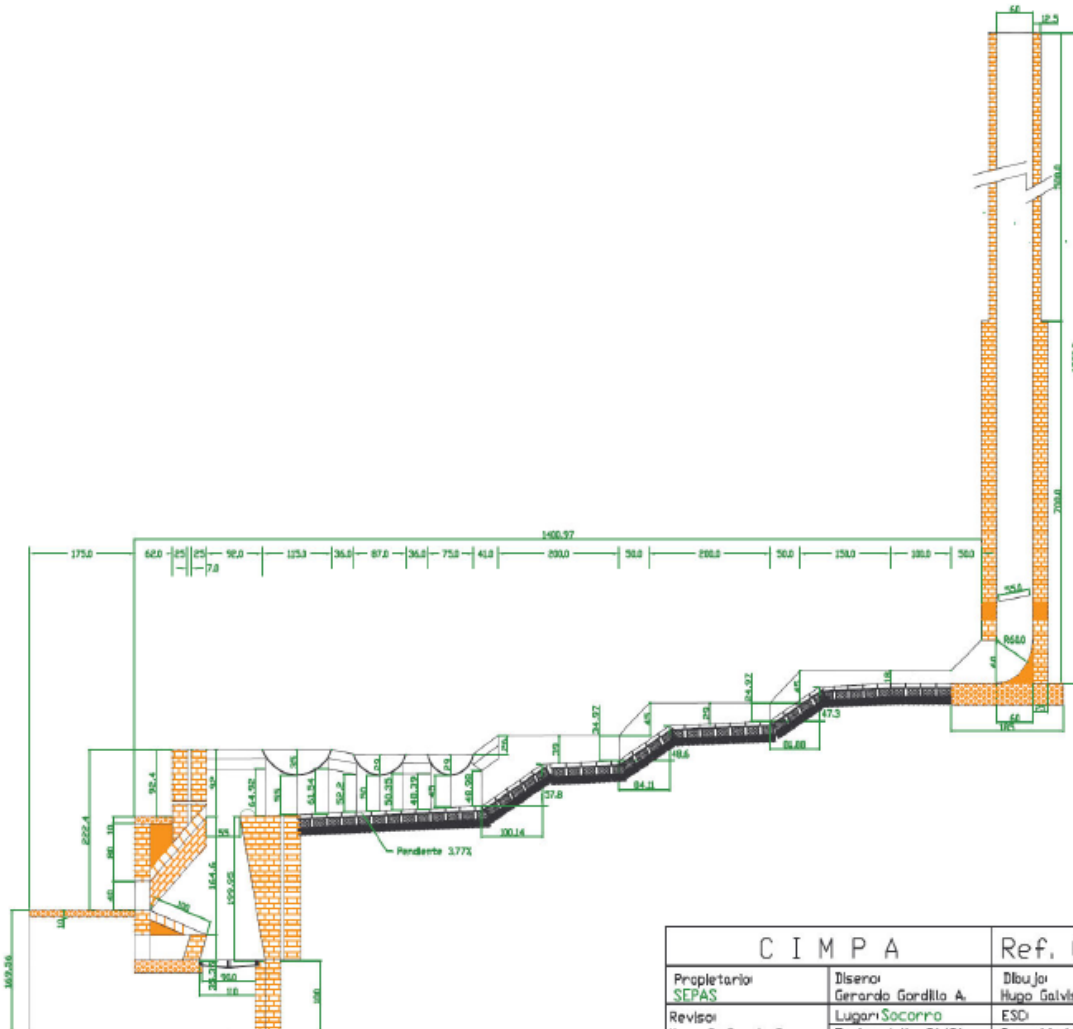
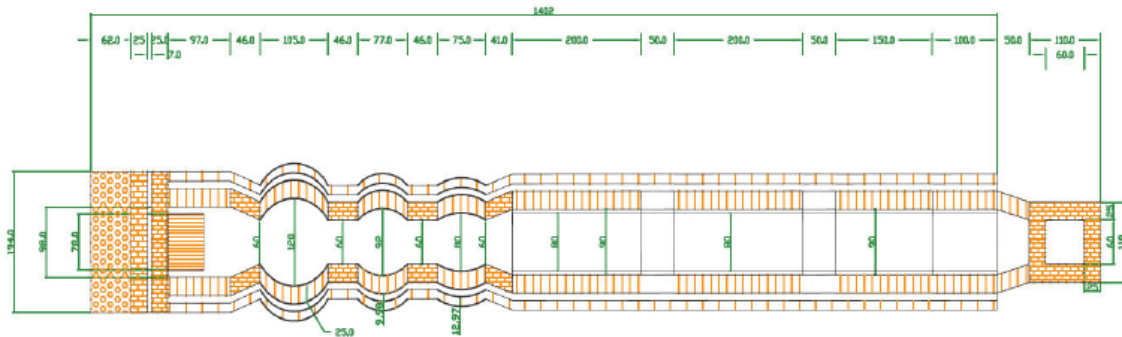
RESTREPO H., Rosember. Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para las pailas aleteada, redonda, plana, pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la industria panelera. Bucaramanga, 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

SMITH-VAN NESS. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 5 ed. McGraw-Hill. México, 1996. 878 p.

SOLER V., Juan P. y GÓMEZ T., Franco H. Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA y Plana-CIMPA en hornillas paneleras. Bucaramanga, 2004. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

ANEXOS

ANEXO A. Planos de una hornilla panelera tipo Ward-CIMPA



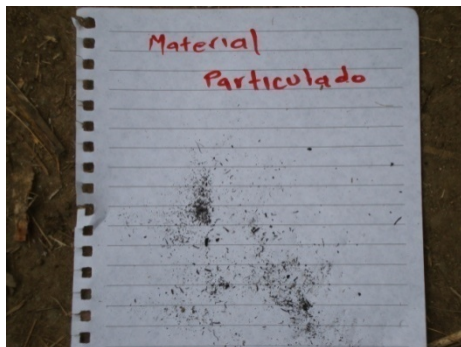
C I M P A		Ref. 008
Propietario: SEPAS	Diseño: Gerardo Gordillo A.	Dibujo: Hugo Galvis P.
Revisor: Hugo R. García B.	Fecha: Julio 31/91	ESD Capacidad 130 Kg/h

ANEXO B. Equipos y materiales utilizados en la experimentación

Cantidad	Equipos	Cantidad	Materiales
1	Analizador de gases Testo 350K-L controlador 3508	3	Lonas (2m) con argollas en cada punta para pesar bagazo
9	Termocuplas tipo K para gases (cortas)	2	Gafas de seguridad
3	Termocuplas tipo K para gases (largas)	2	Pares de guantes de cuero
2	Termómetro digital Testo 735 con dos entradas	243	Bolsas Ziploc de 1kg
1	Datalogger de 16 entradas	243	Bolsas Ziploc de 5kg
2	Balanza electrónica Kern HCB 200K 100 (200 kg de capacidad)	18	Tapaboca
1	Sistema de succión para medición de material particulado	1	Recipientes metálicos para la ceniza
1	Horno estufa Memmert, modelo 30, 220V, Tmax 200°C	20	Costales (lona) para empacar bagazo
1	Balanza analítica Mettler, modelo AE240, 110-220V, (240g de capacidad)	2	Trinche
1	Refractómetro digital portátil Reichet (0-95%)°Brix, modelo AR 200 digital	2	Flexómetro 7,5m
1	Refractómetro digital portátil	1	Decámetro

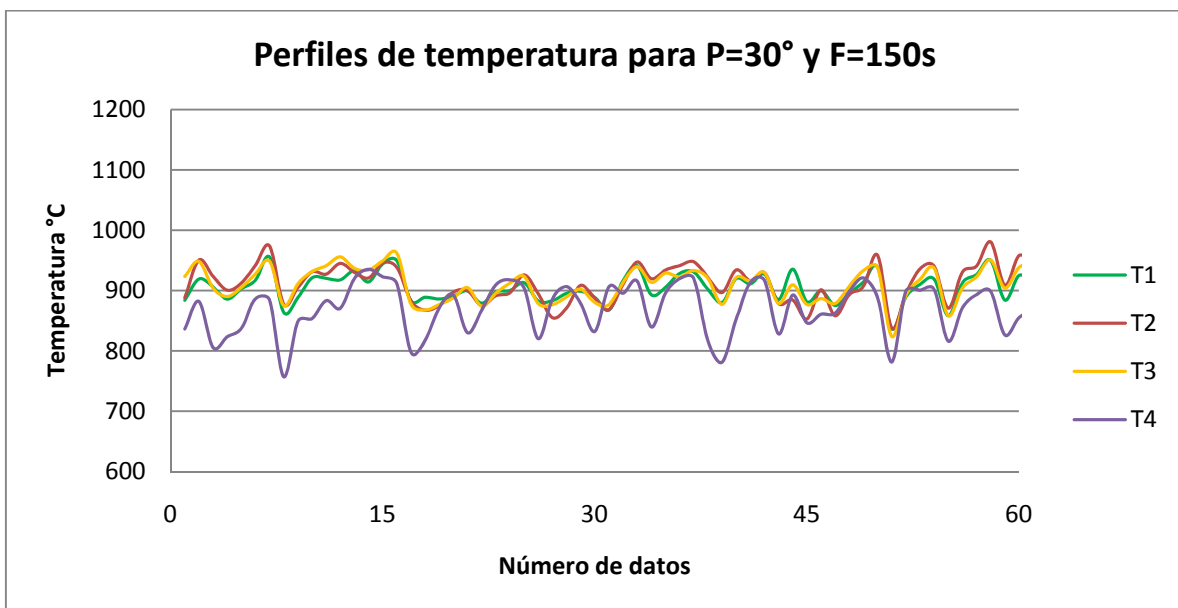
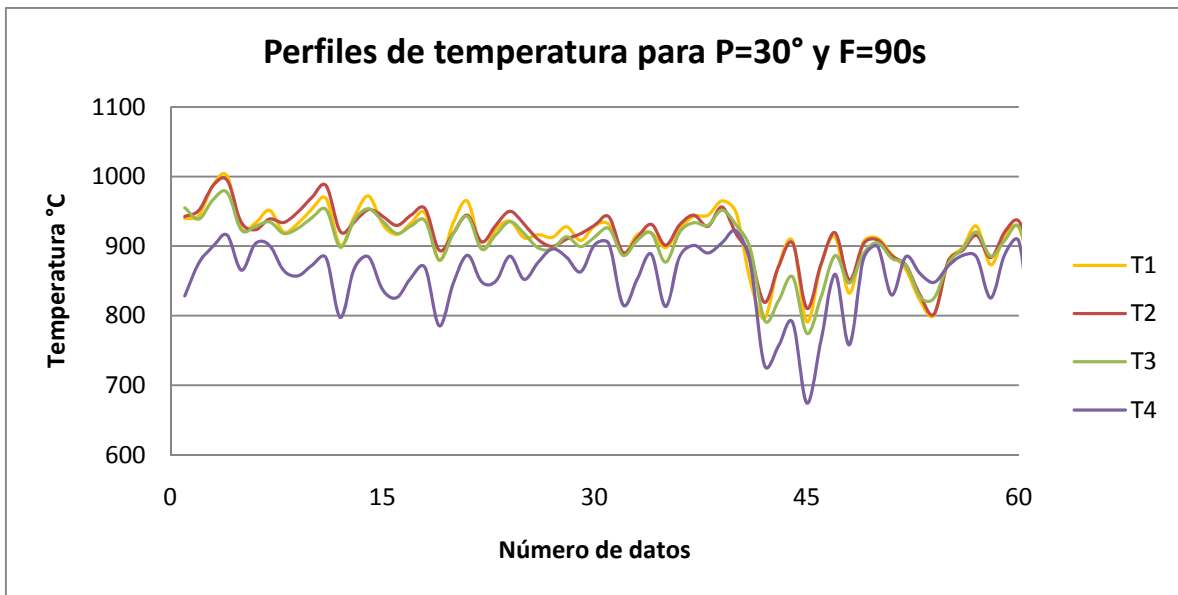
	ATABO (0-53)°Brix		
2	Cronómetros	1	Tamiz 6, tamiz 12, tamiz 16
2	Termocuplas Testo tipo K para jugos	1	Lamina para recolectar la ceniza
2	Micromanómetro (vel de 2-6m/s)	1	Resma de papel
1	Computador portátil DELL (inspiron 1420)	1	Botiquín de primeros auxilios
1	Equipo isocinético		

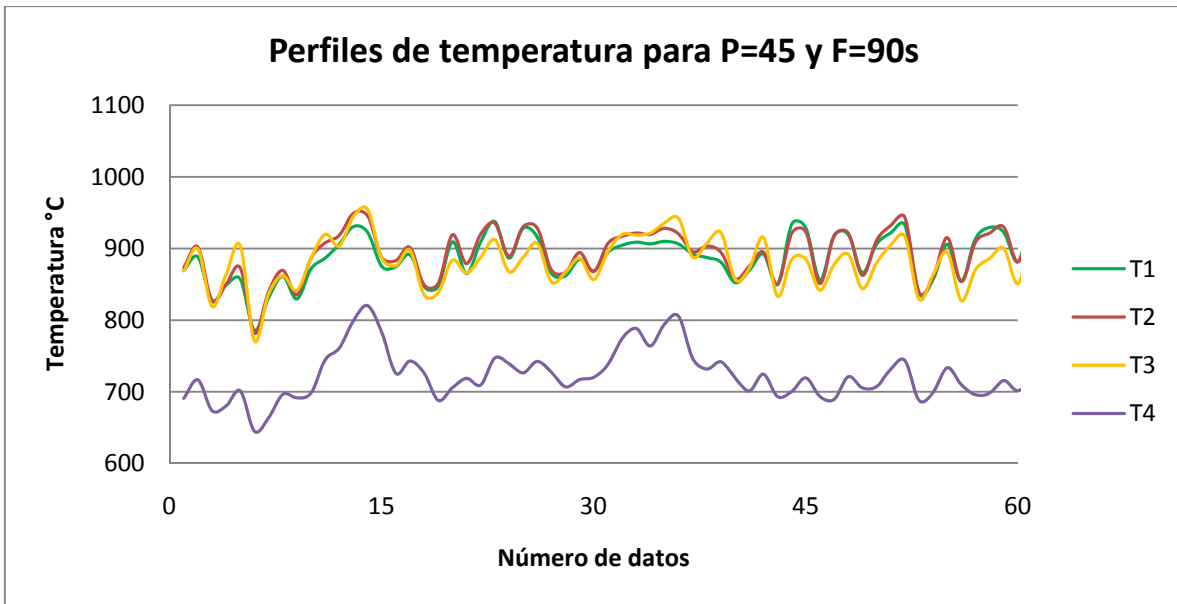
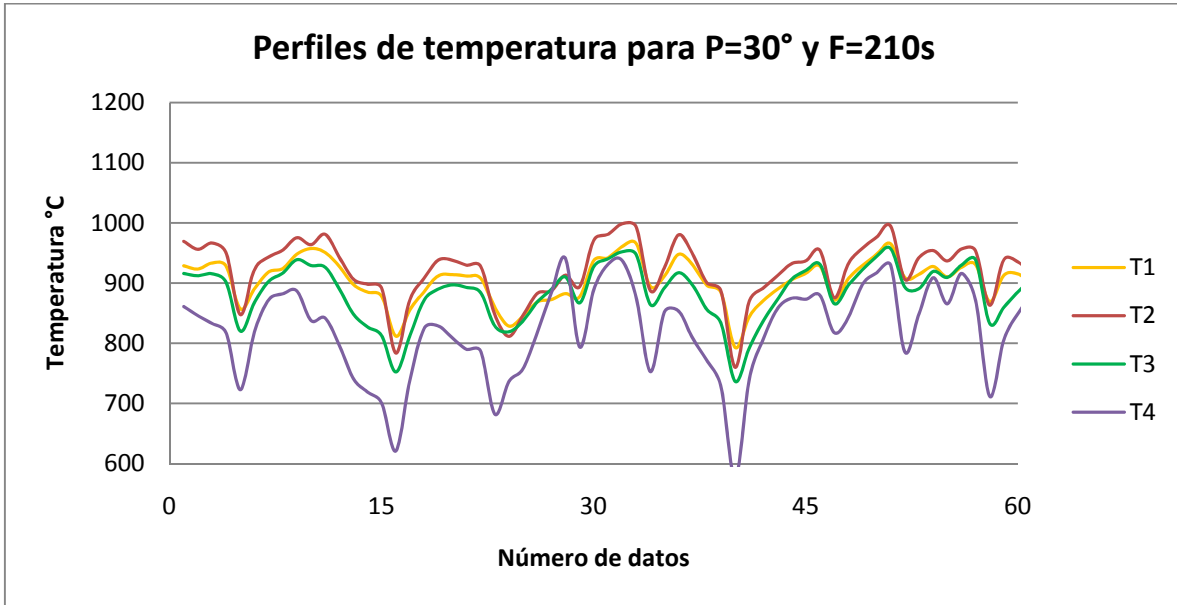
ANEXO C. Montajes de los equipos en campo.

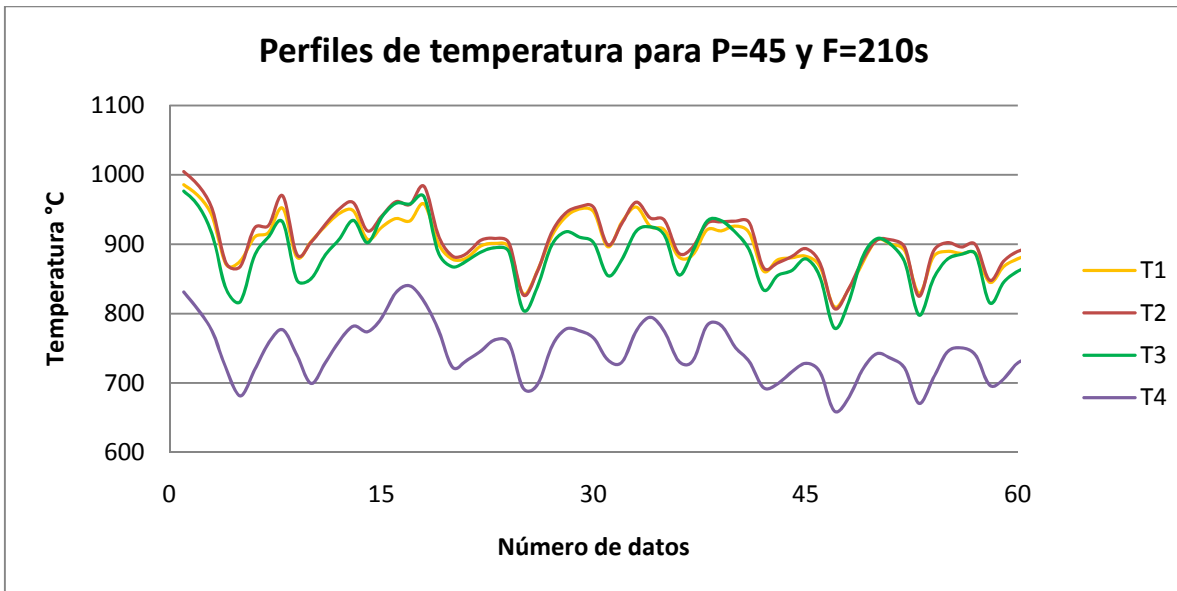
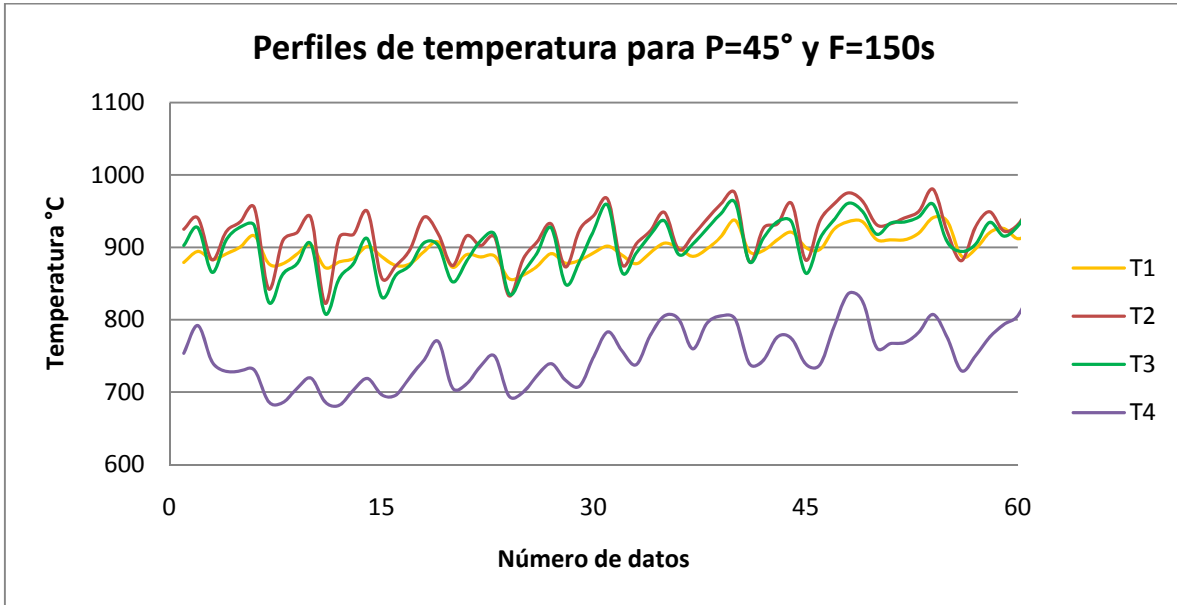


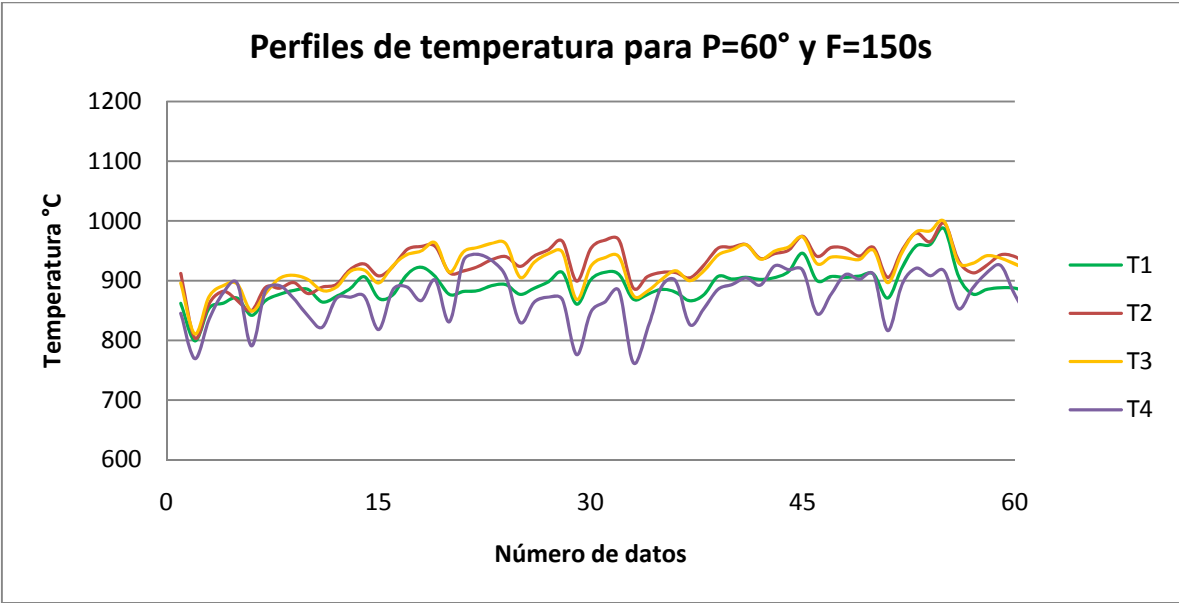
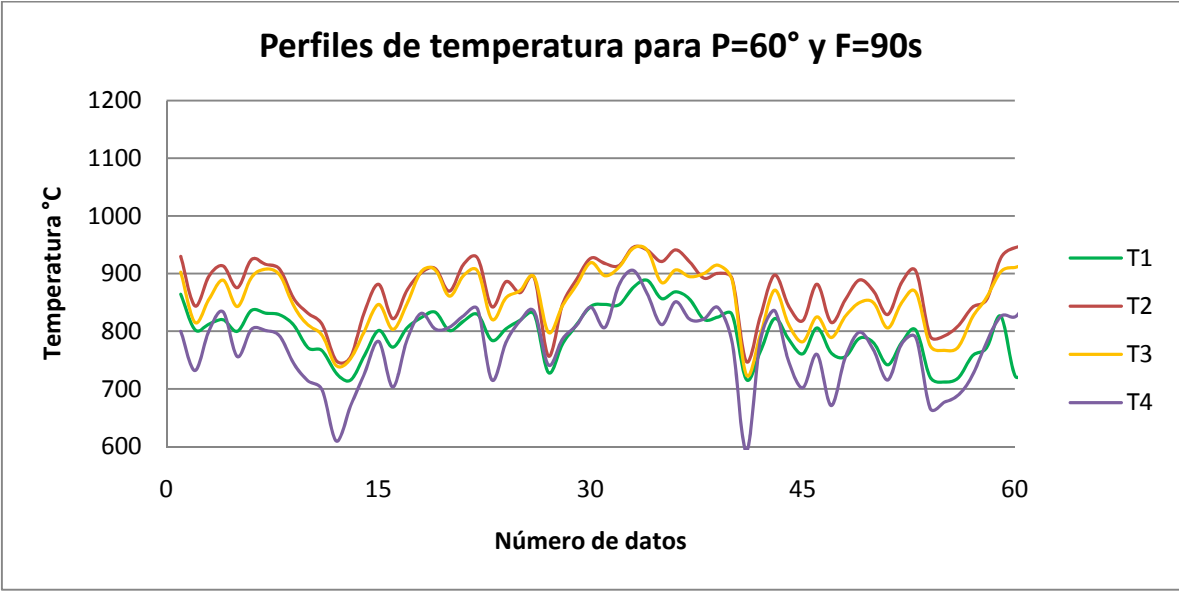
ANEXO D. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla

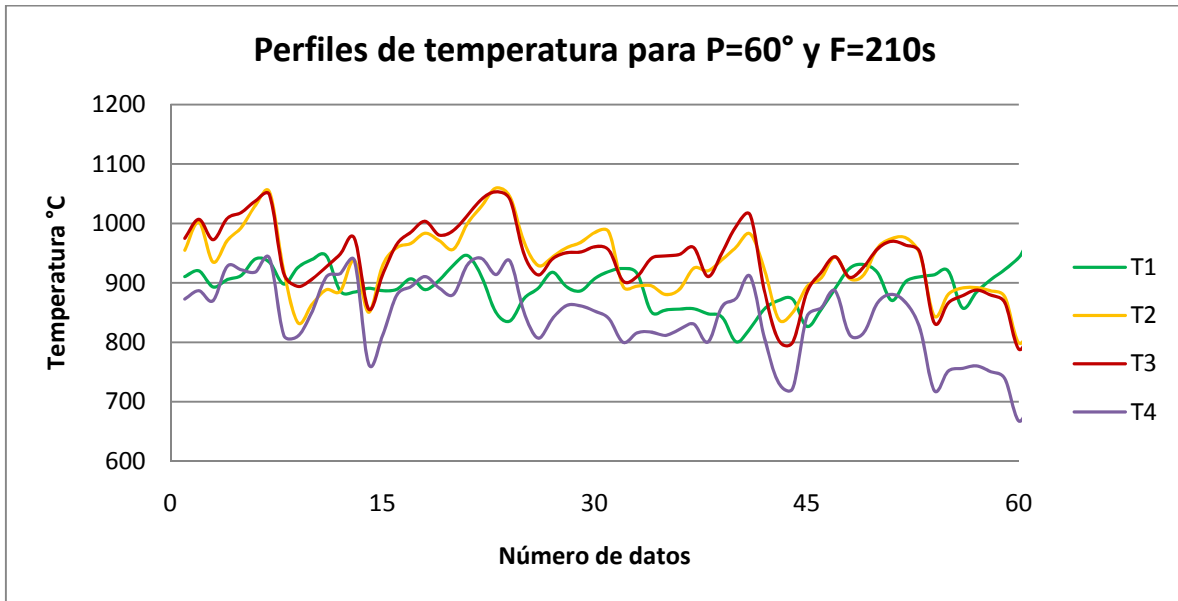
1





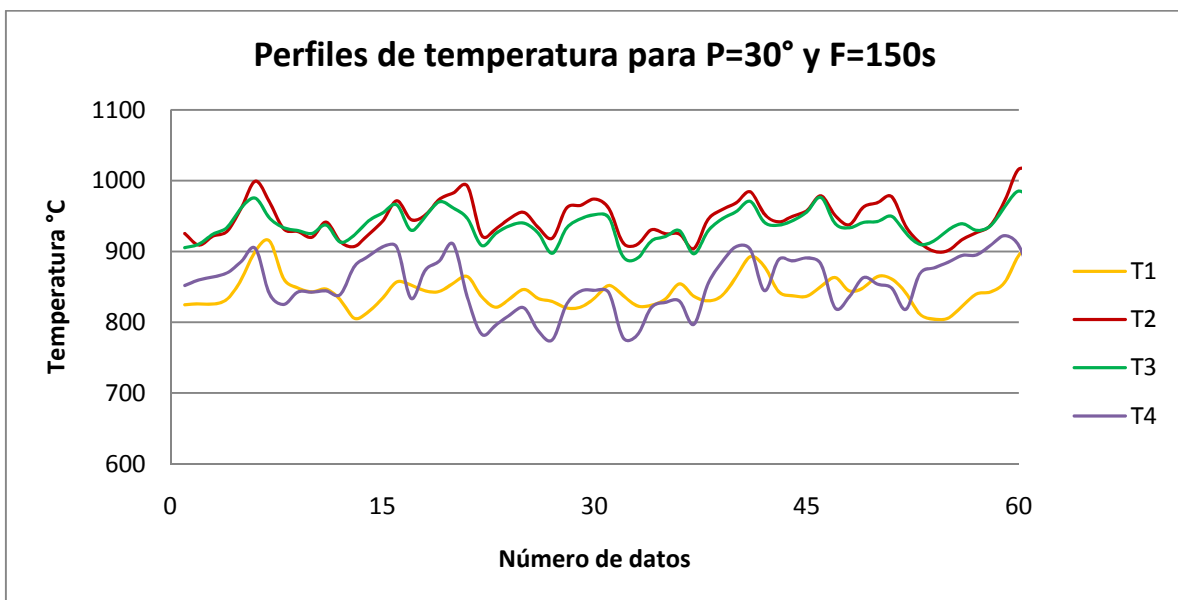
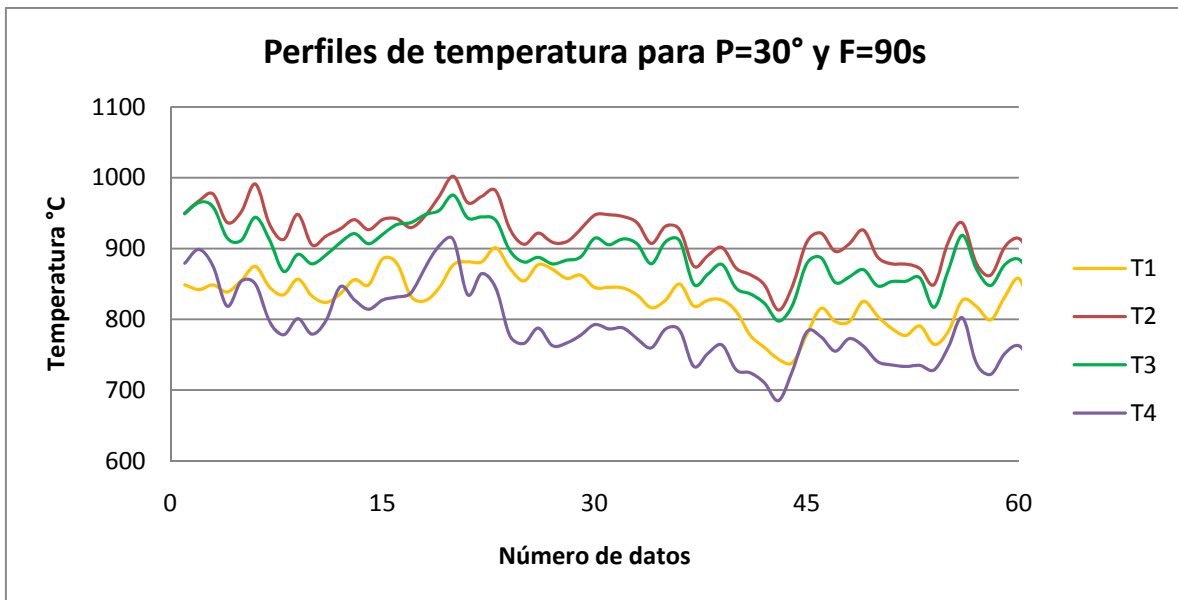


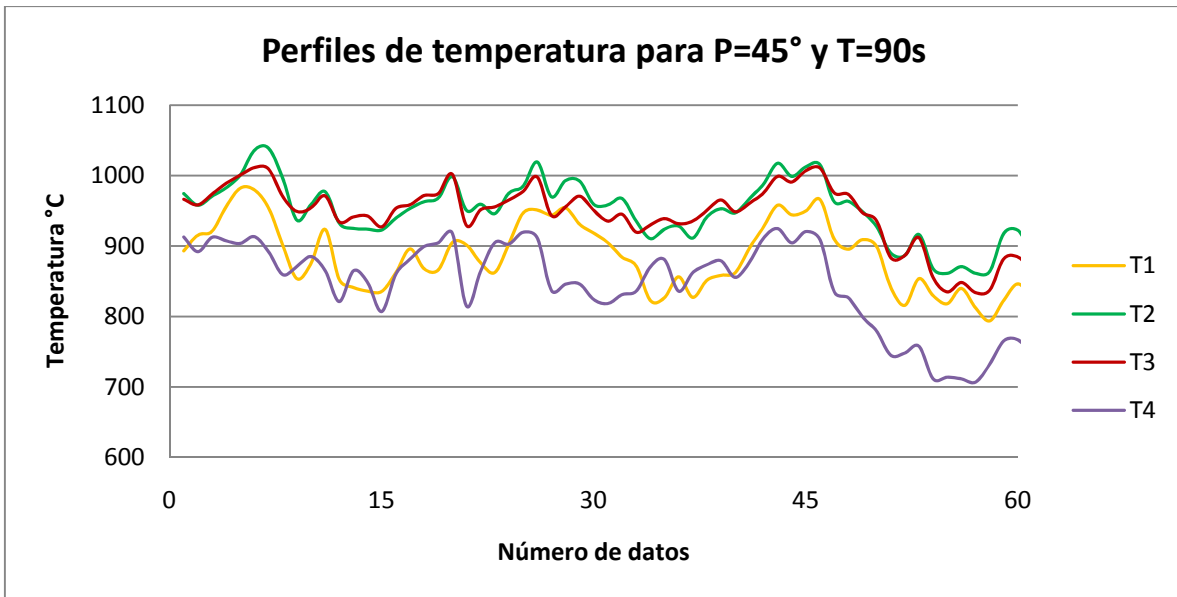
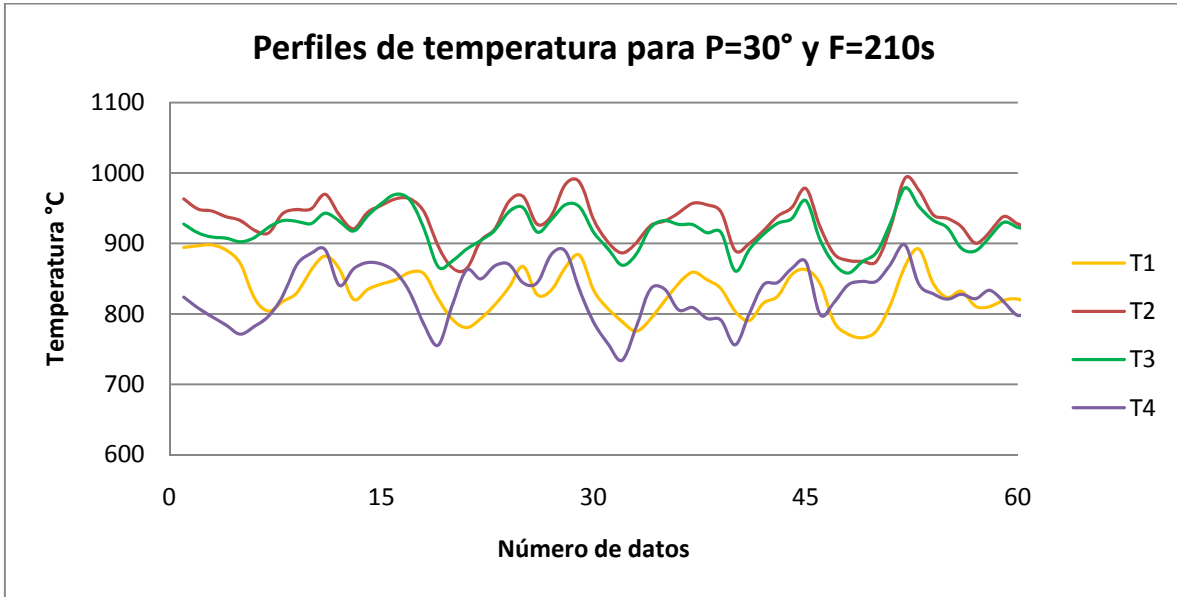


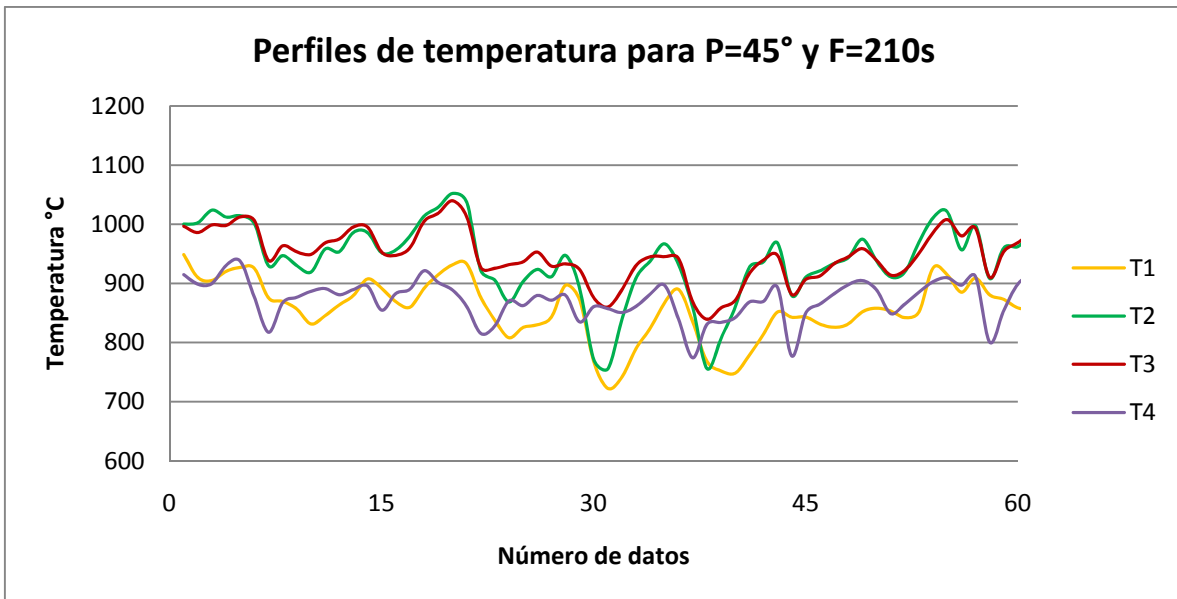
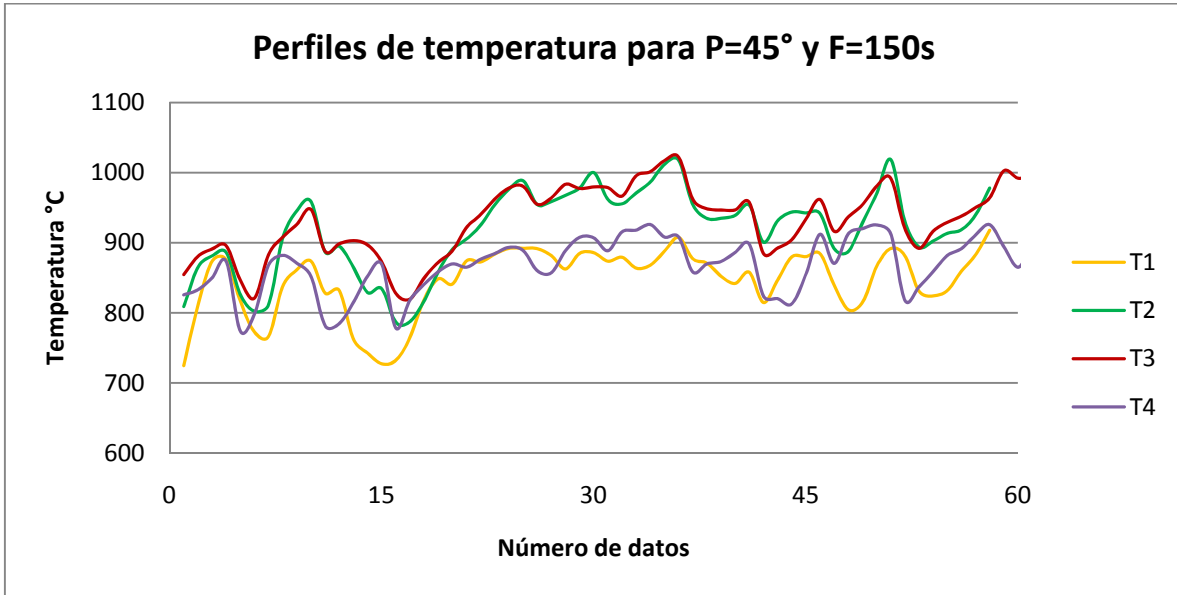


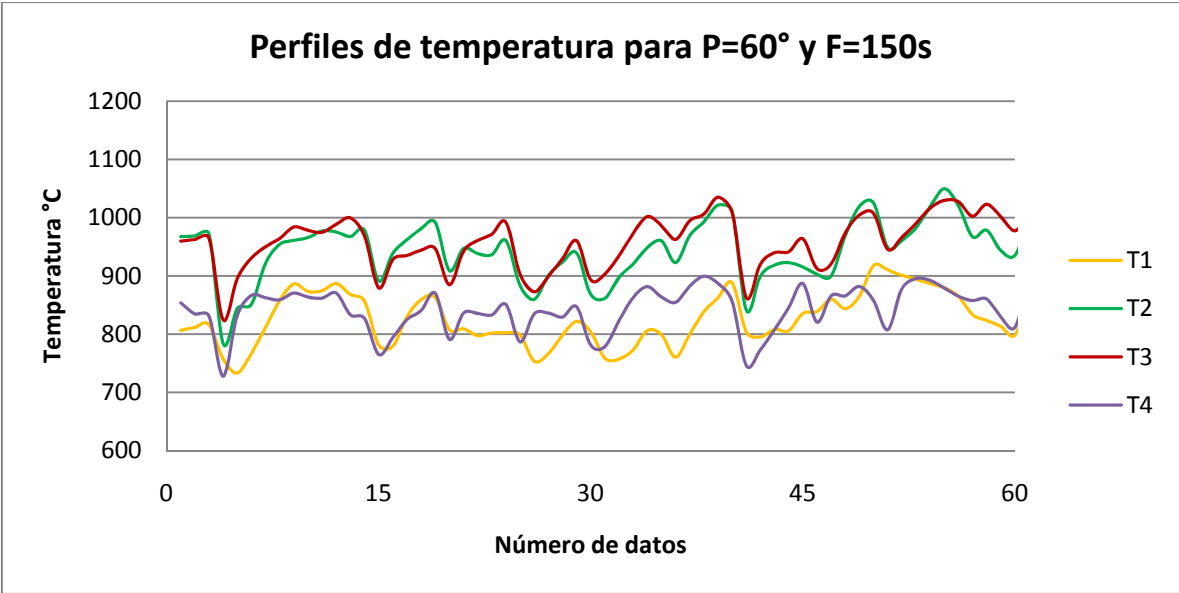
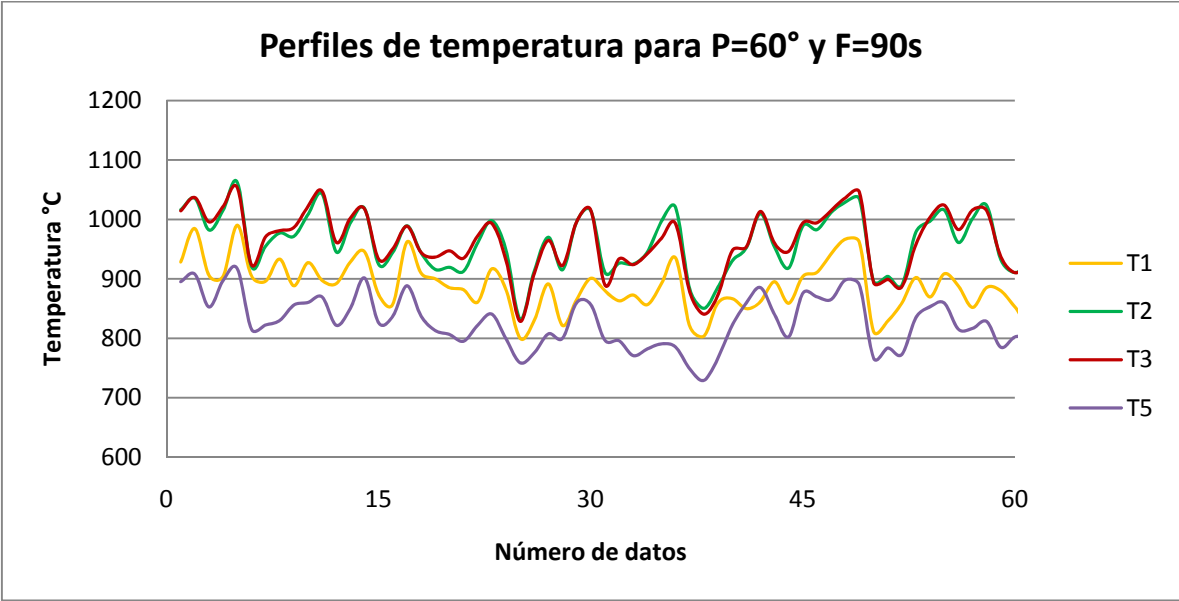
ANEXO E. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla

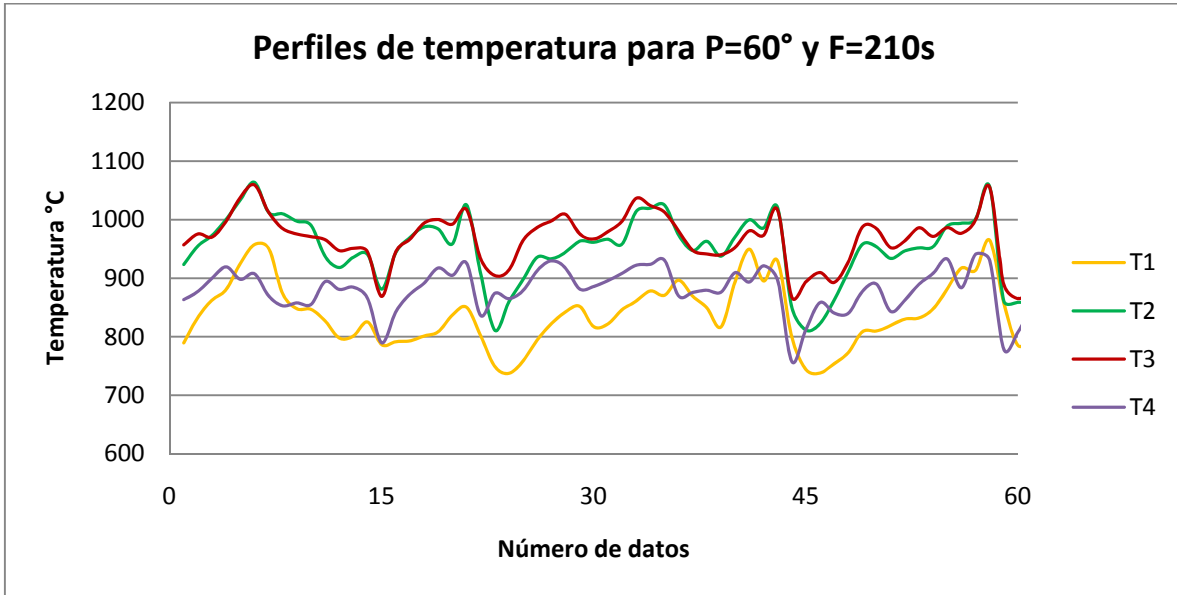
2





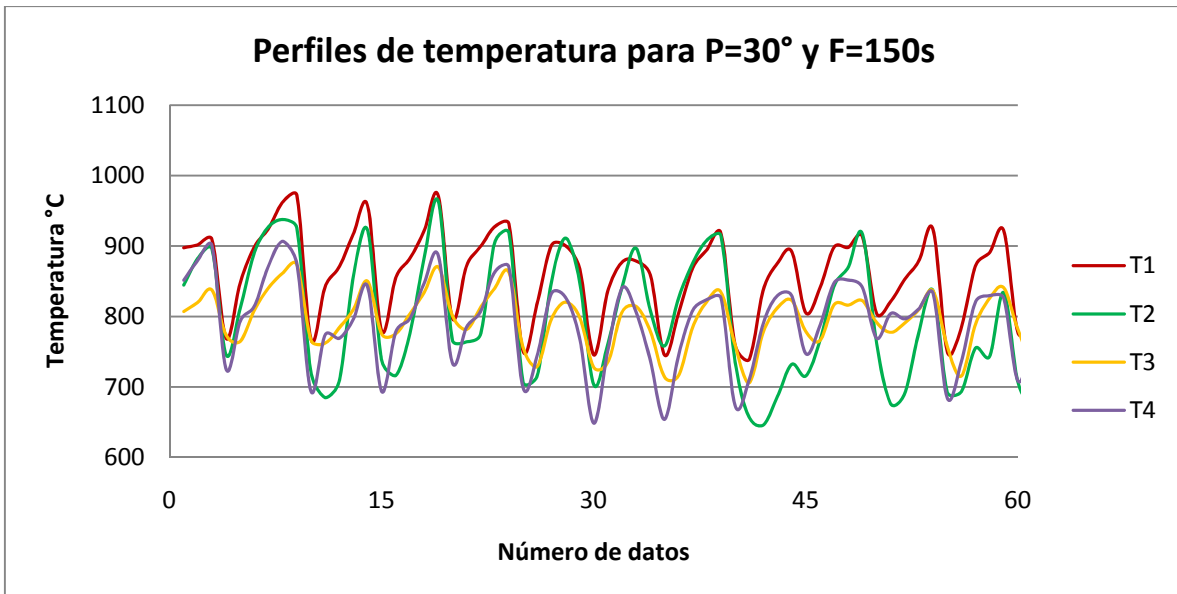
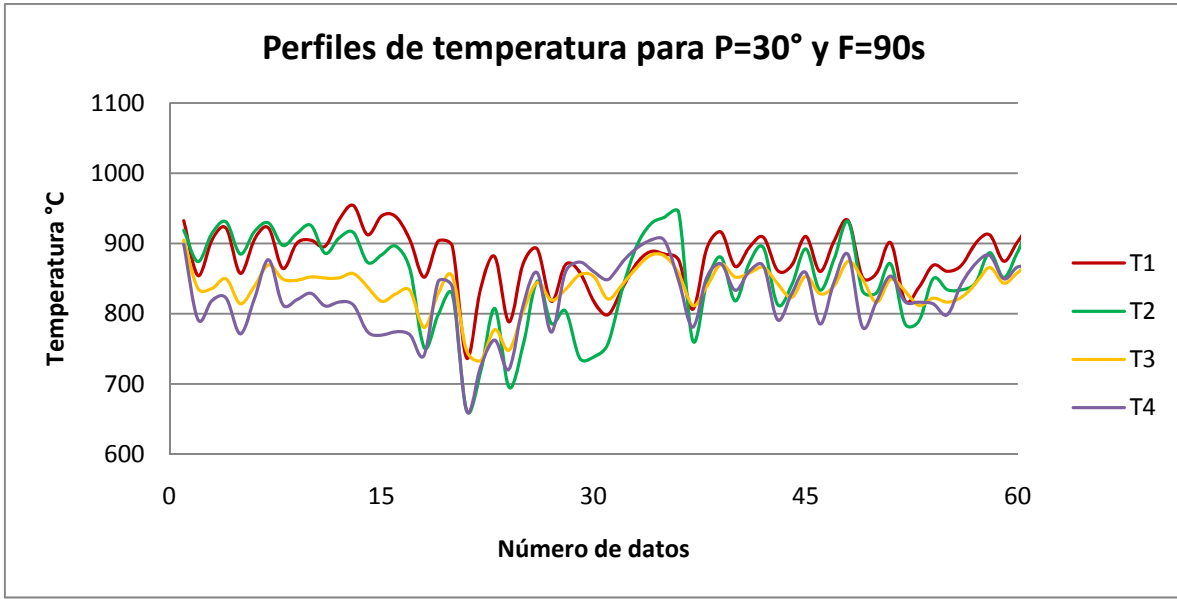


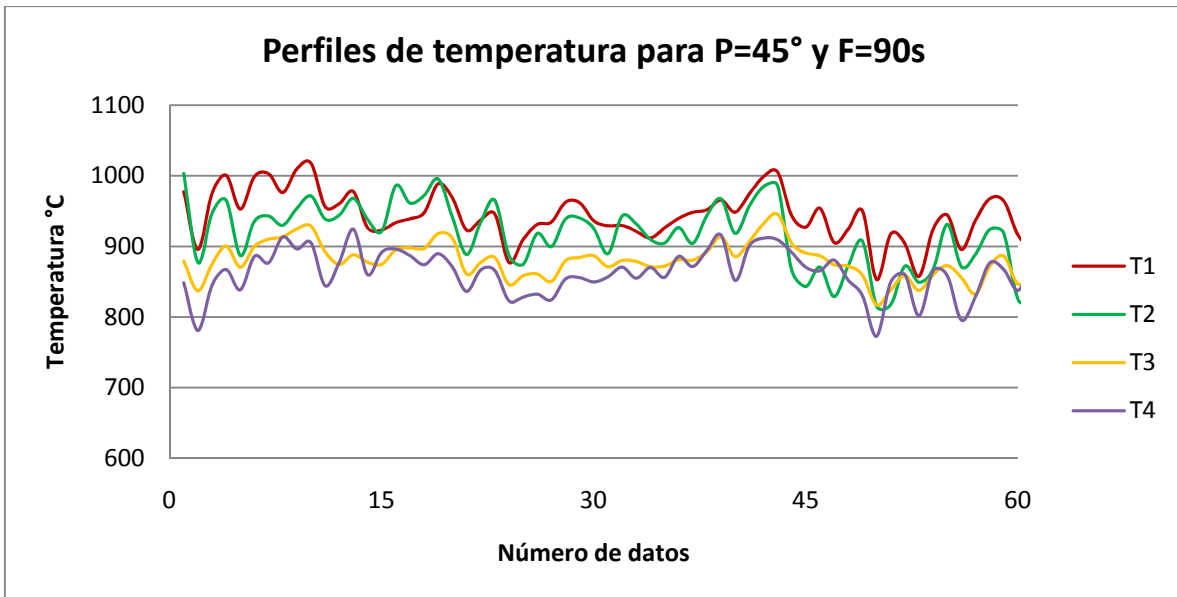
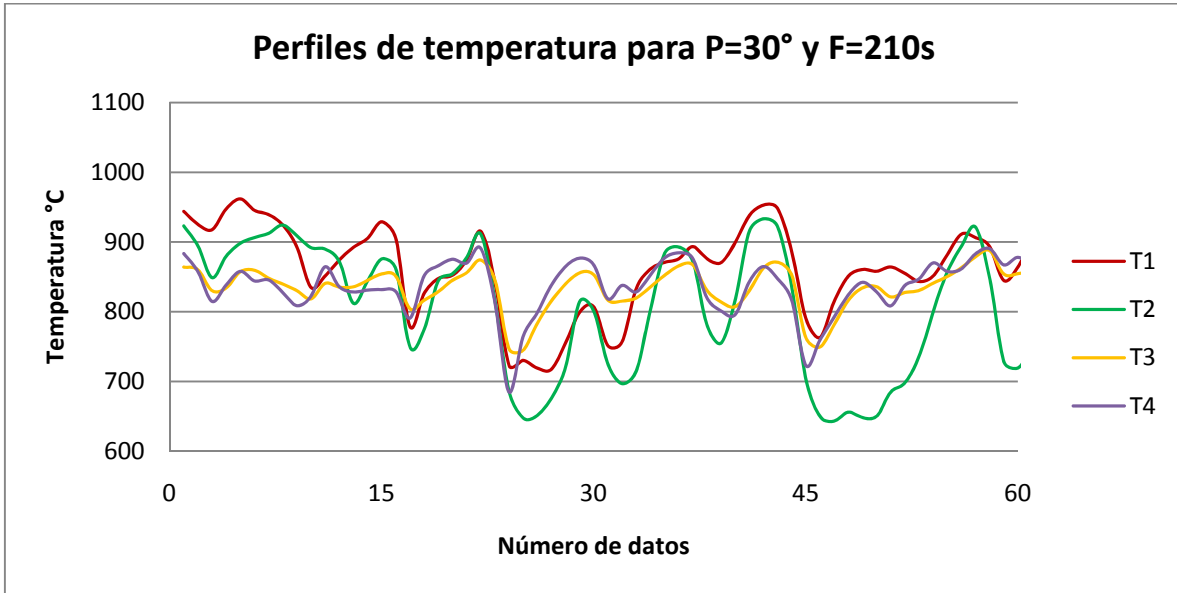


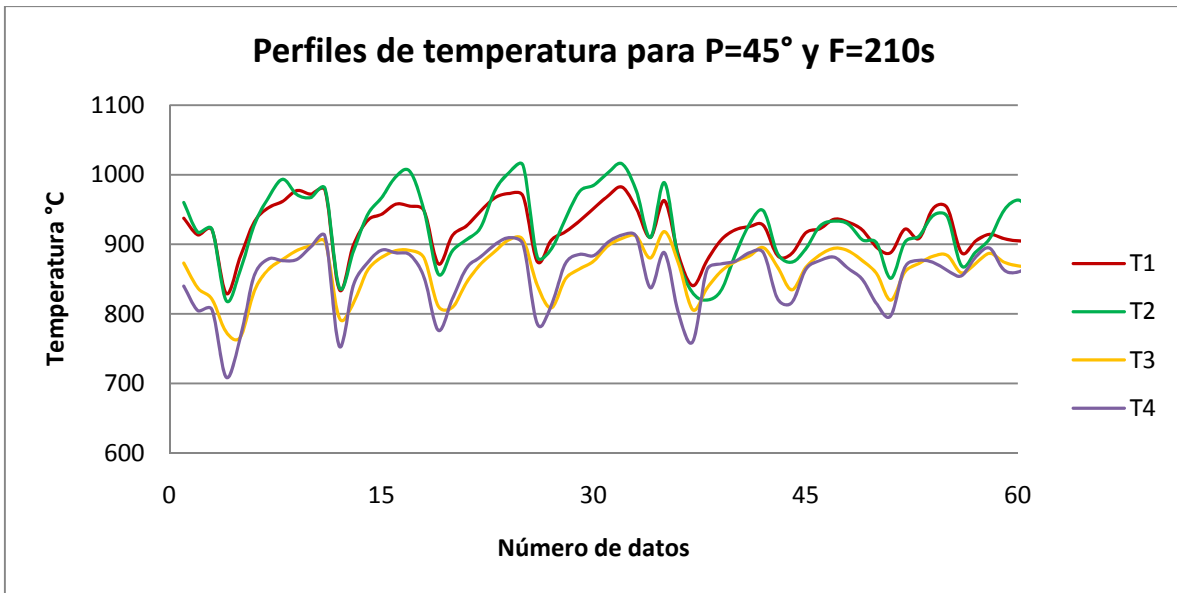
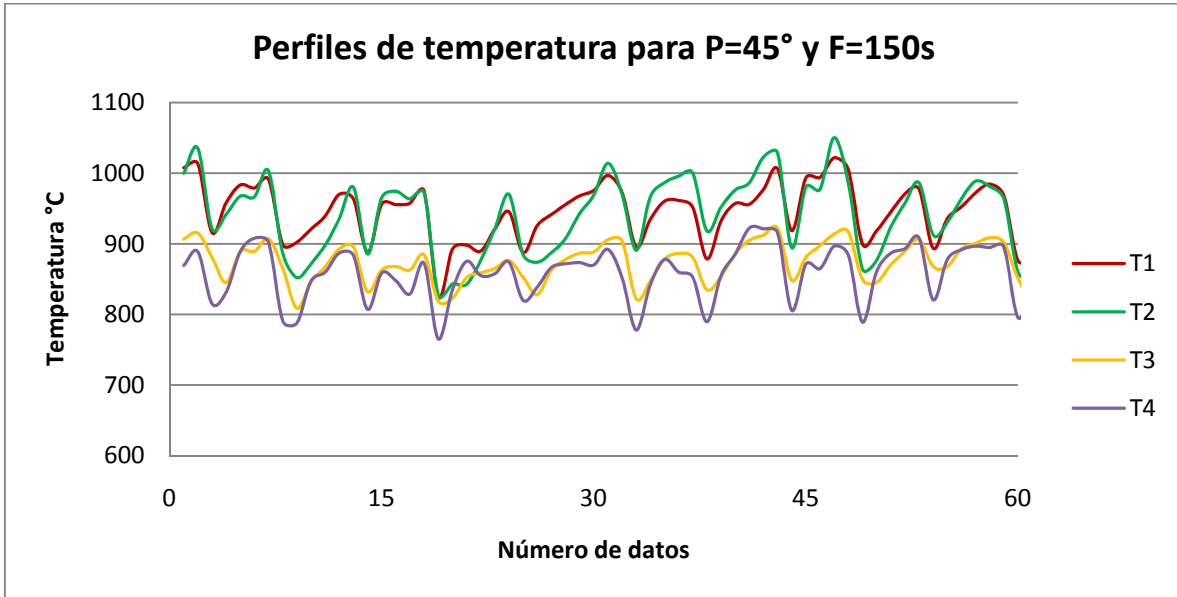


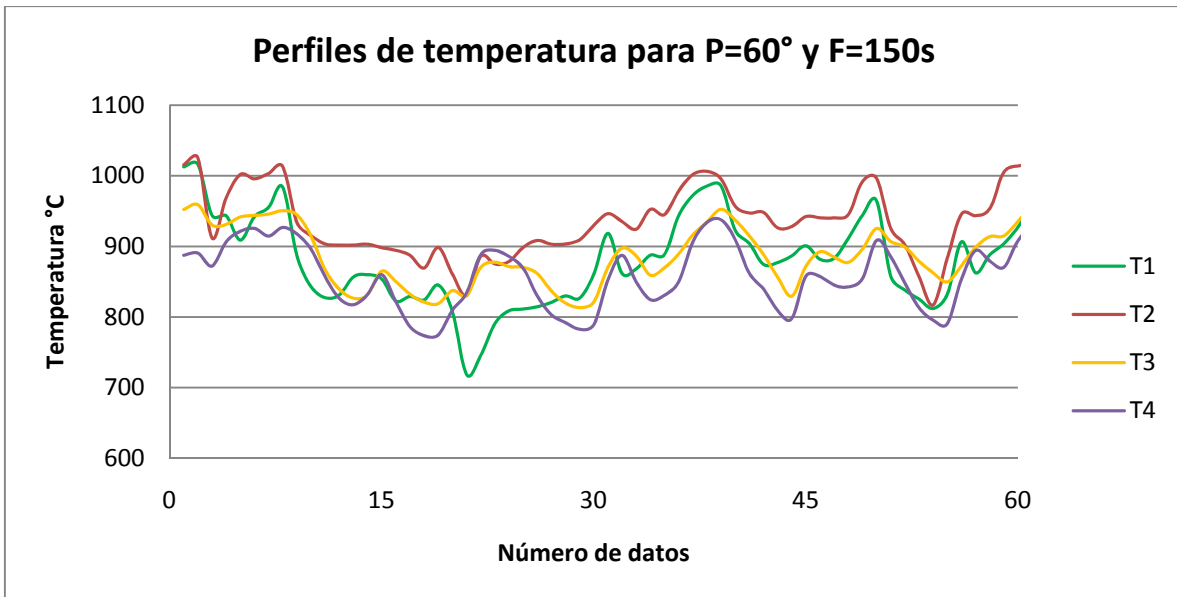
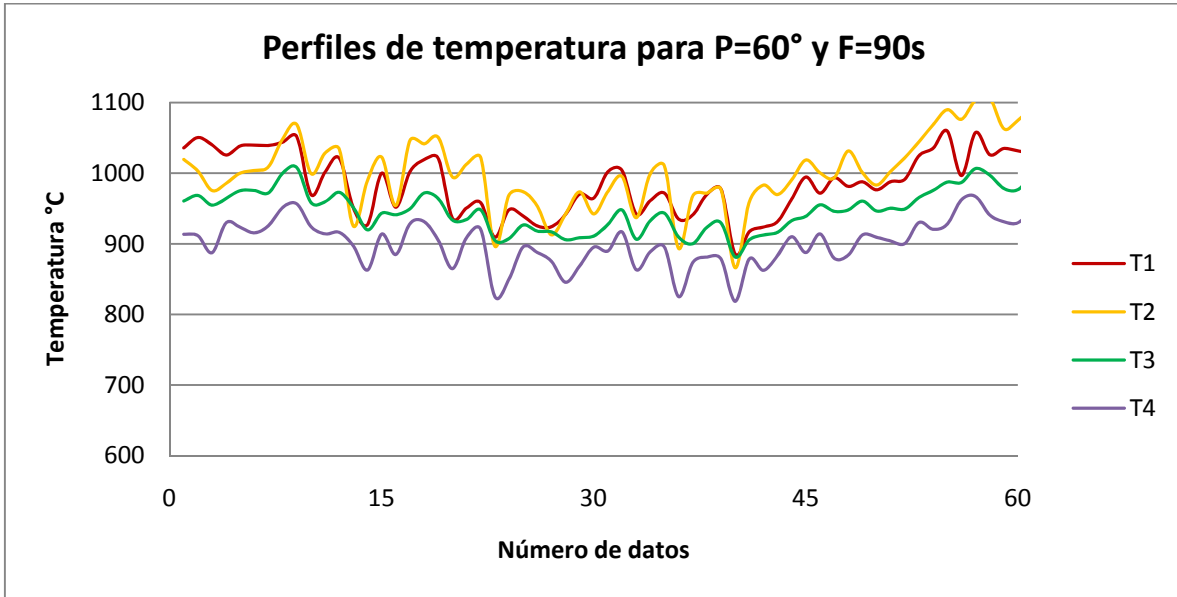
ANEXO F. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla

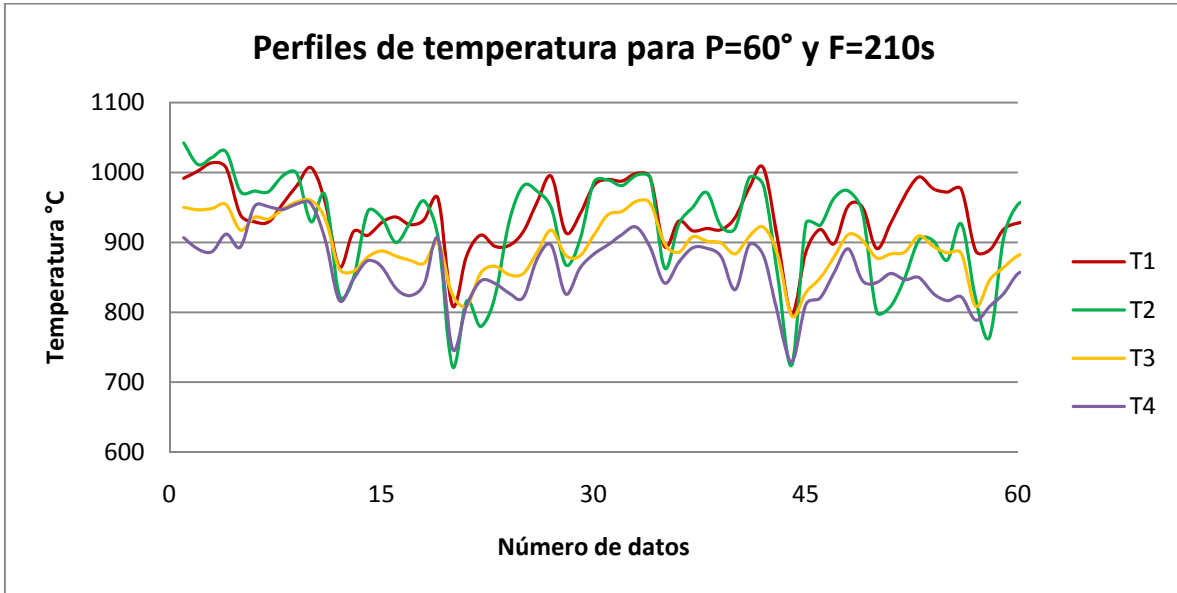
3





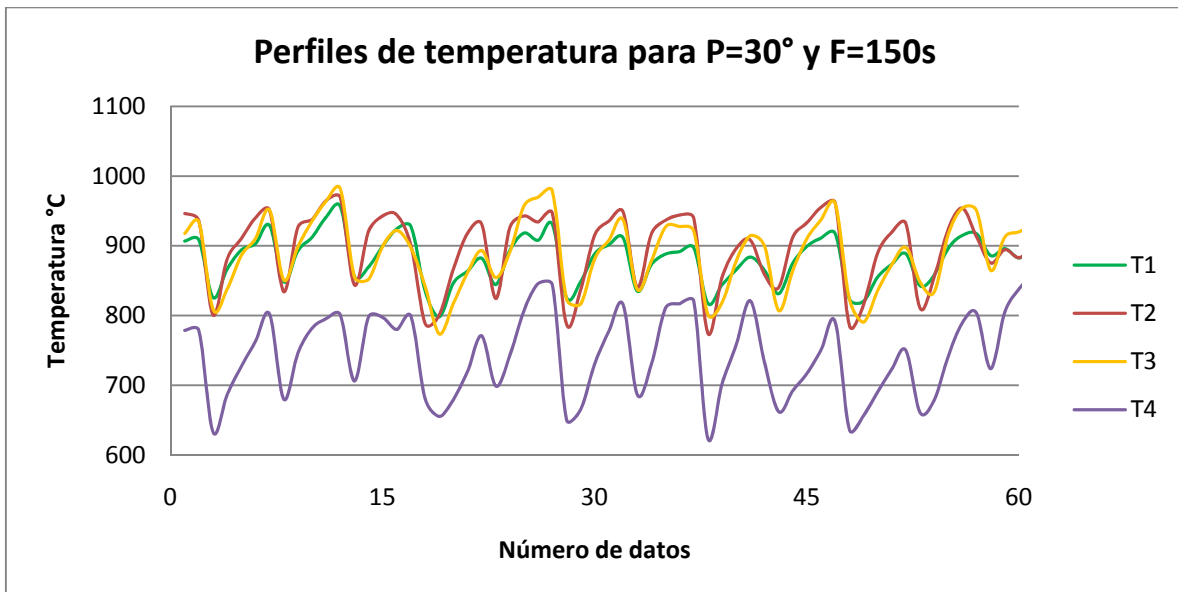
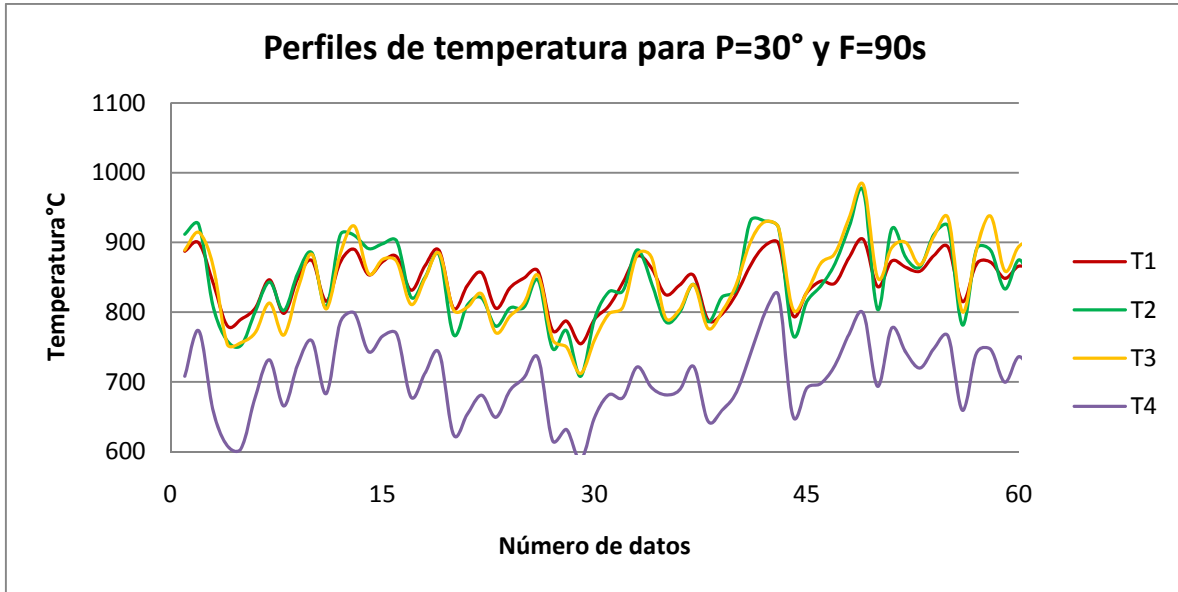


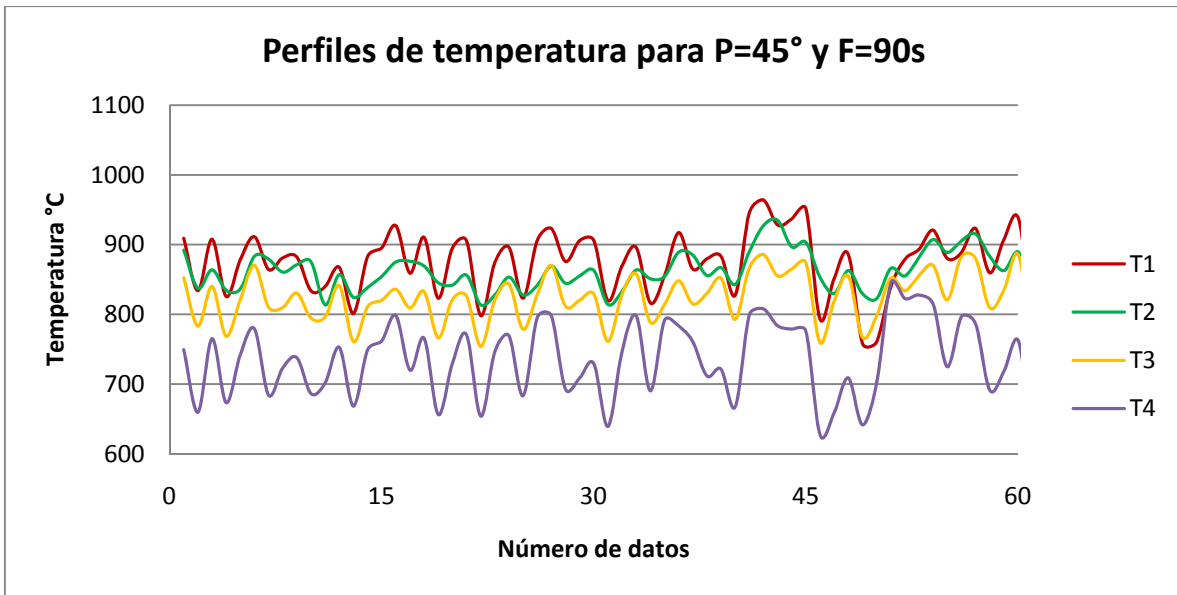
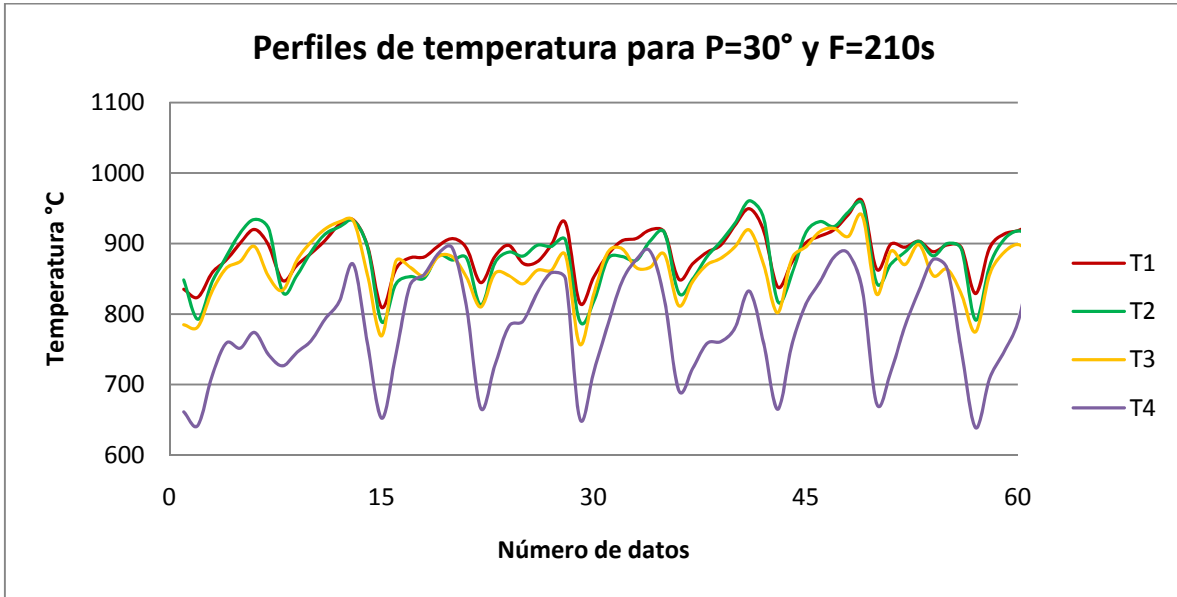


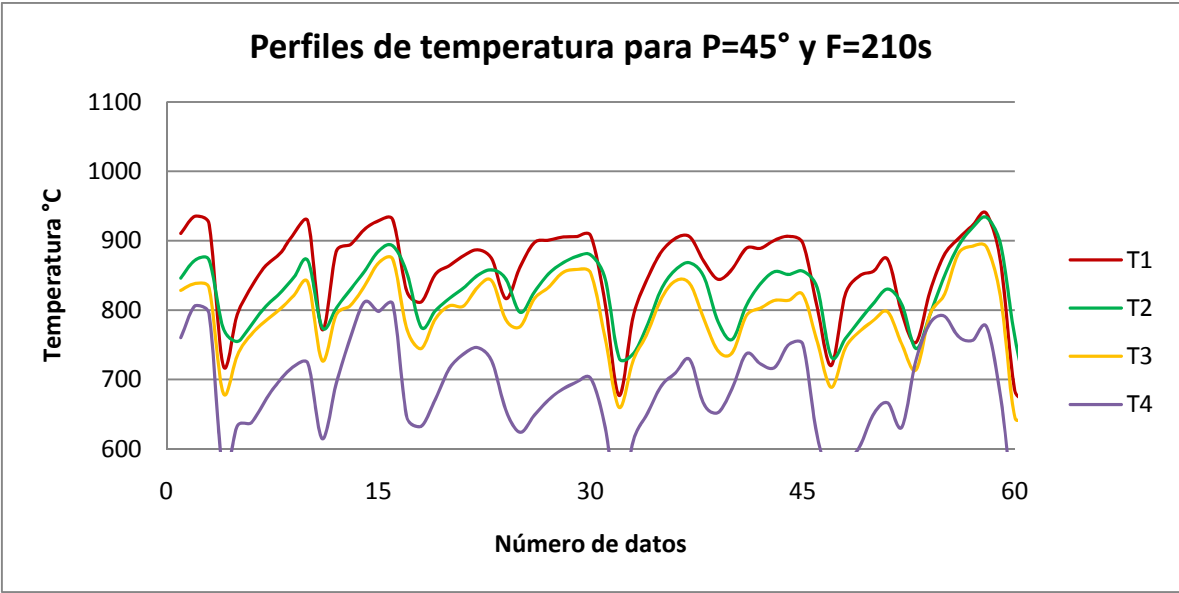
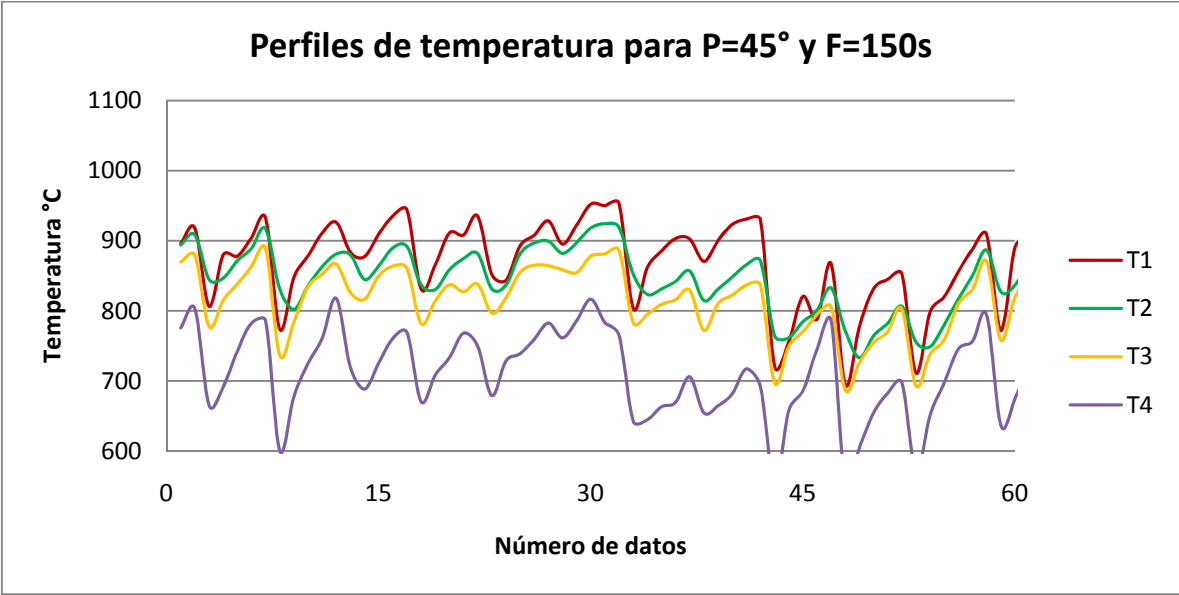


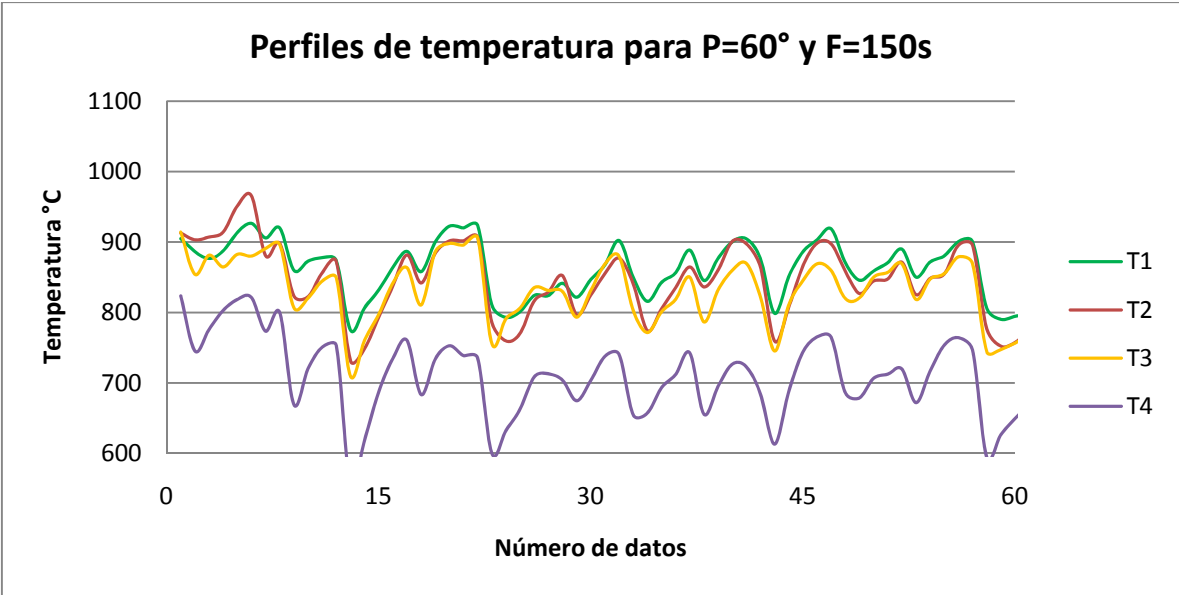
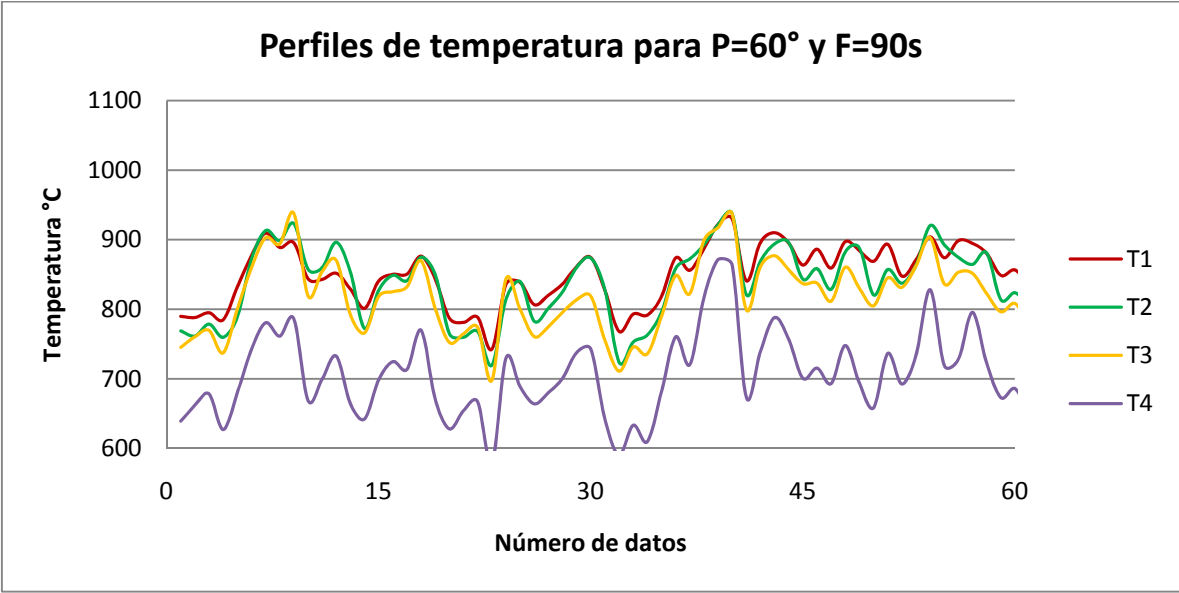
ANEXO G. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla

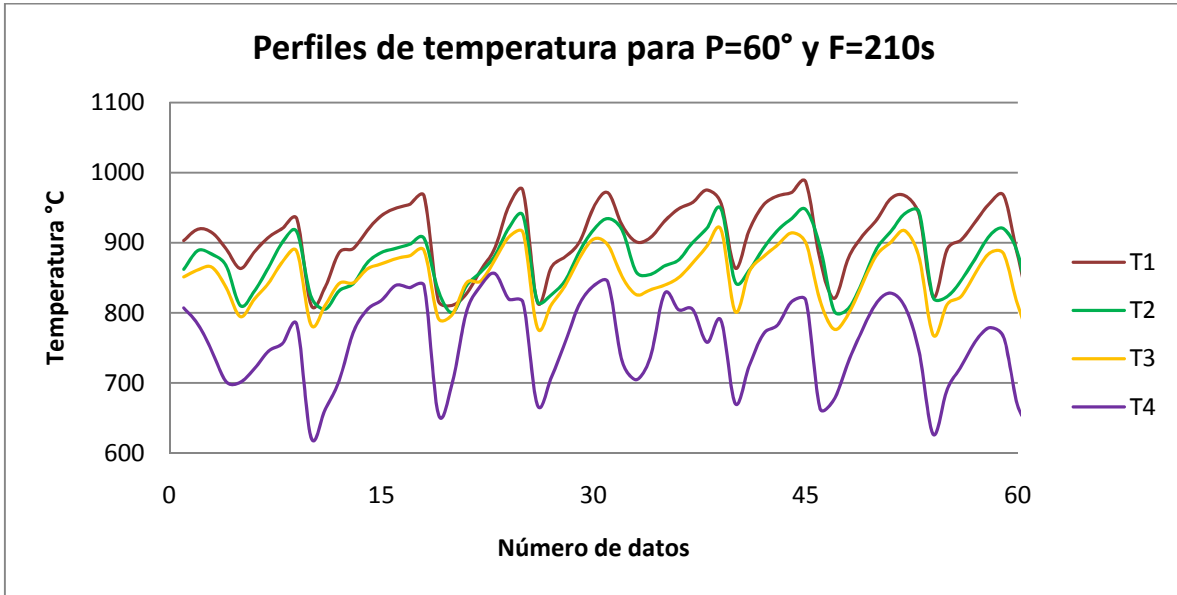
4





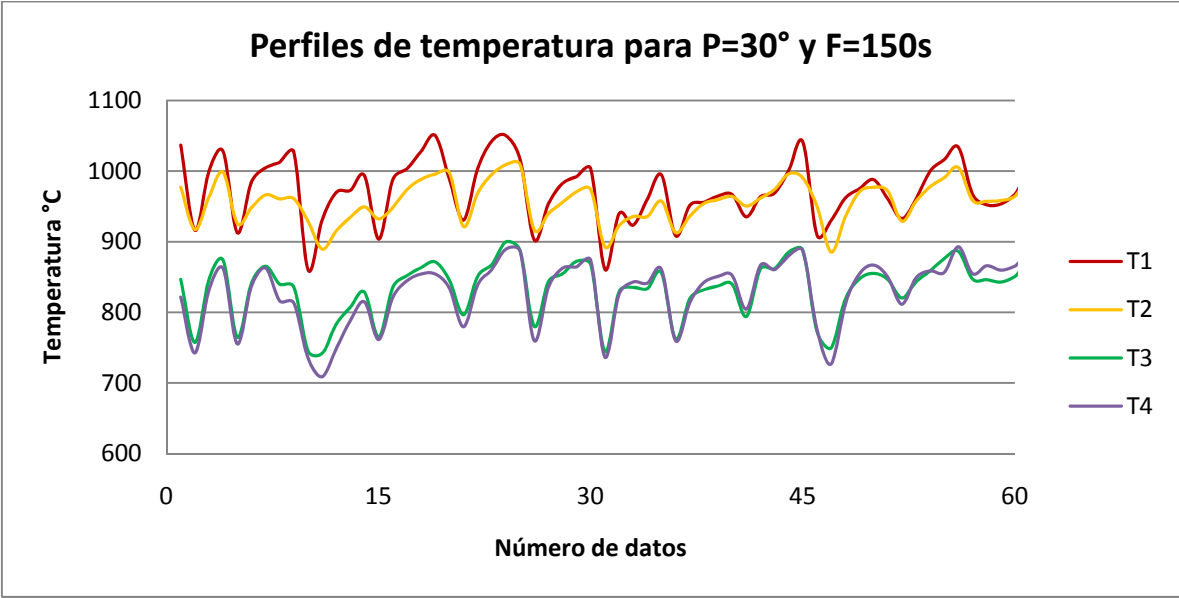
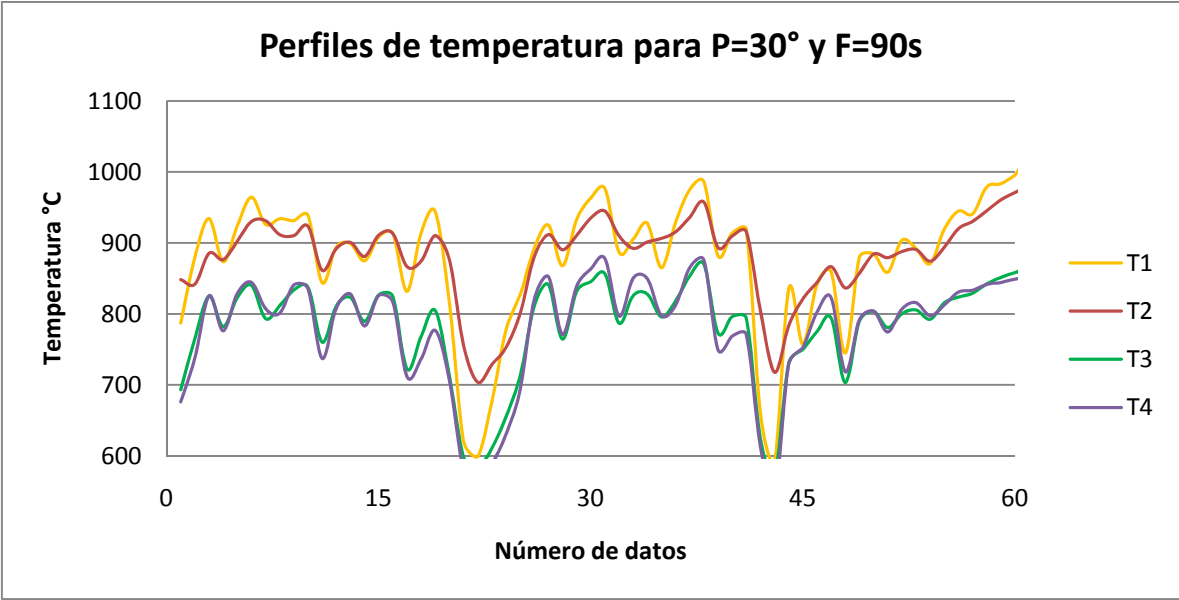


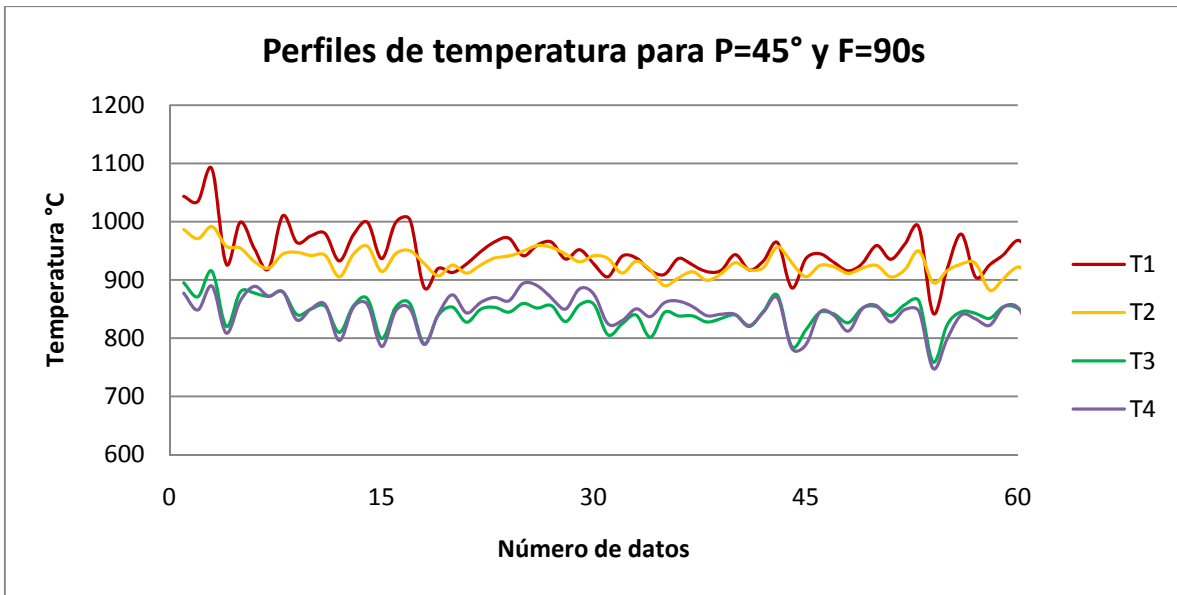
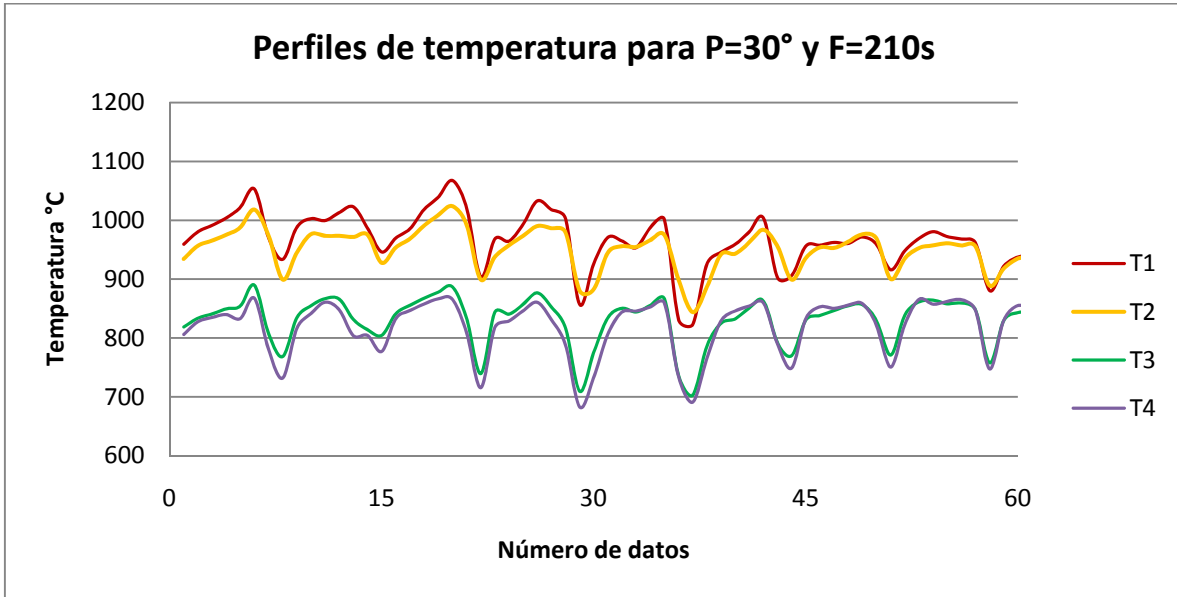


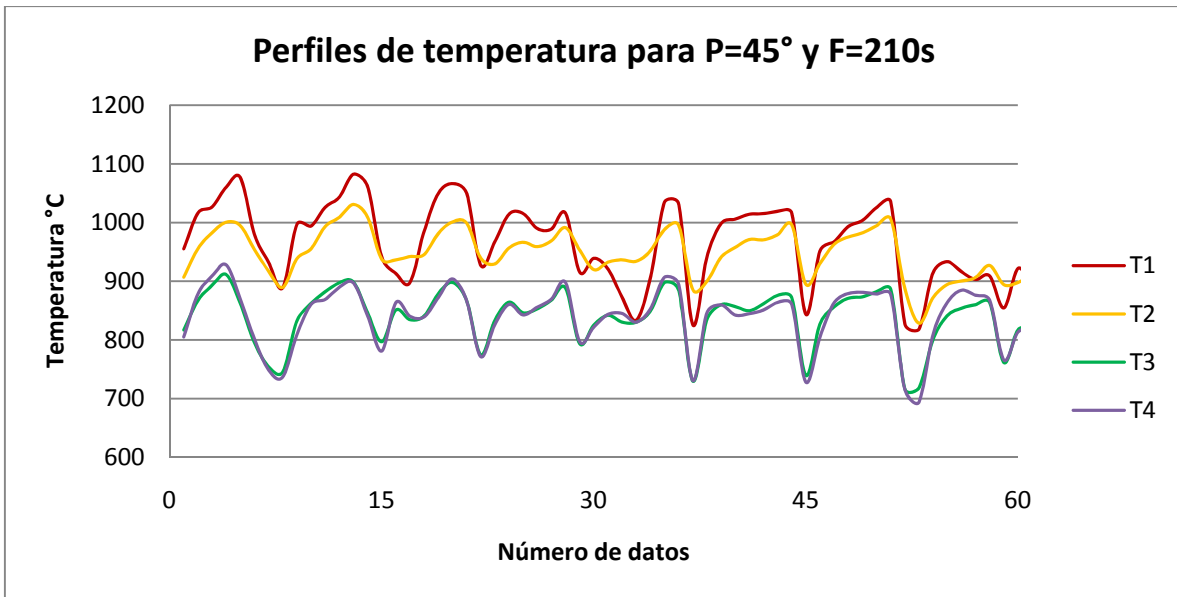
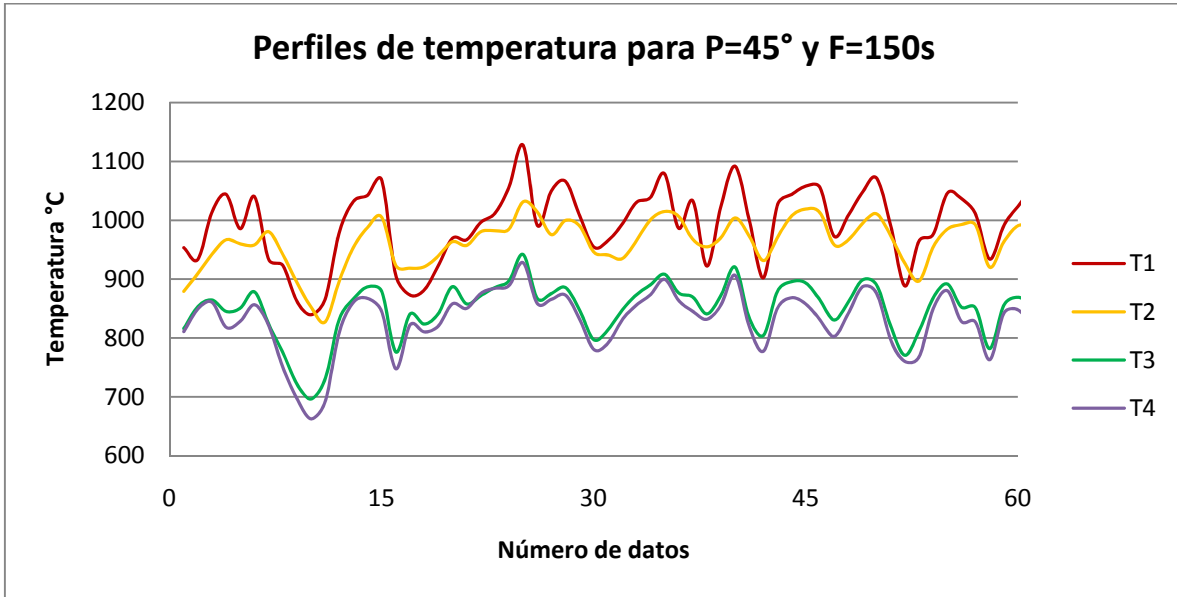


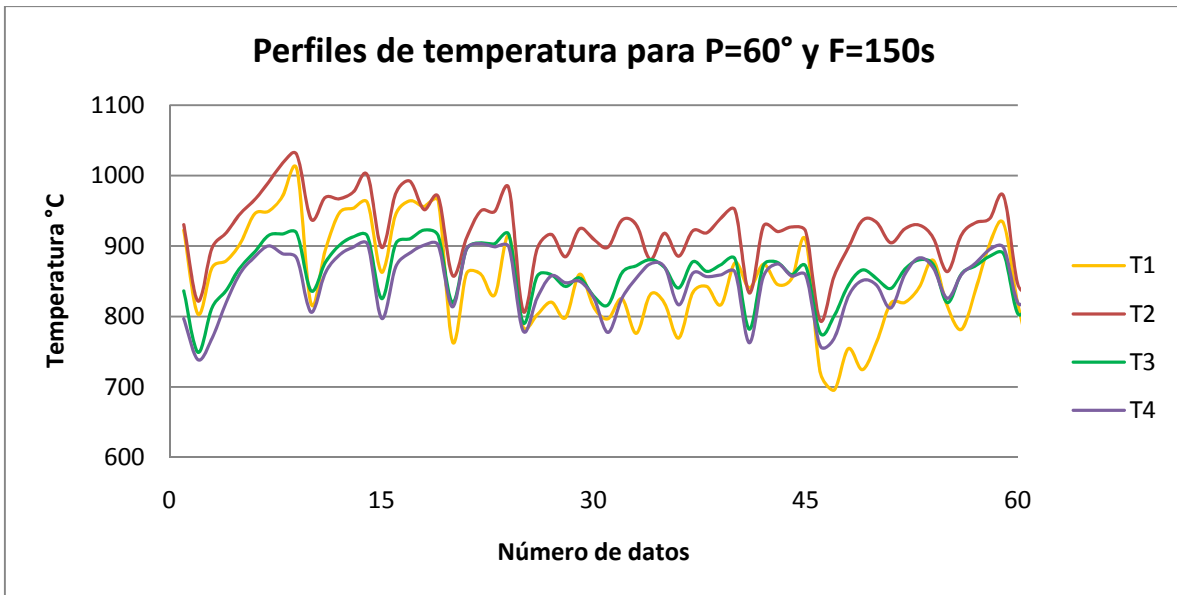
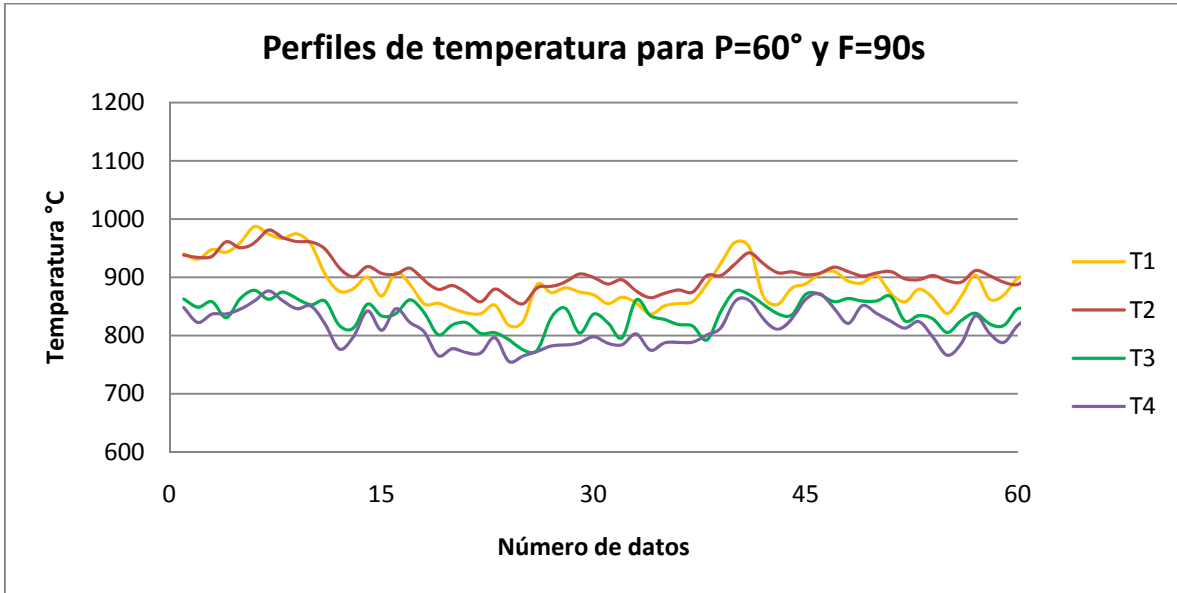
ANEXO H. Perfiles de temperatura en la cámara de combustión de la hornilla

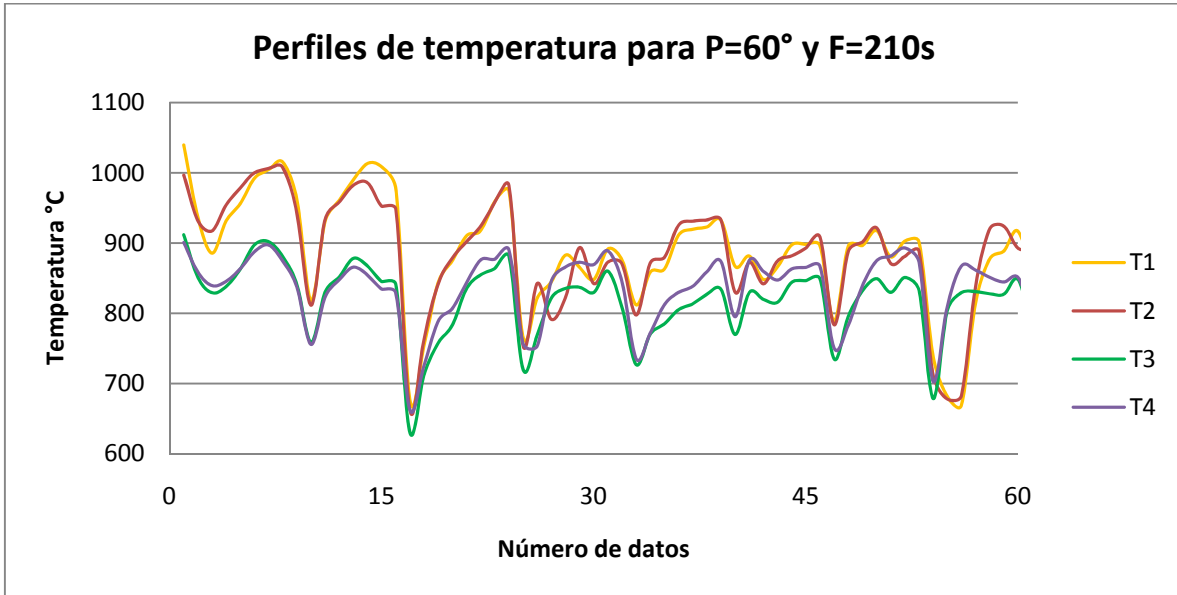
5











ANEXO I. Composición de los gases de combustión en fracción volumétrica

Hornilla	Experimento			Fracción de CO ₂		Fracción de CO		Fracción de O ₂	
	Q (kg/h)	P	F (s)	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
1	402	30°	90	0,10930	0,08555	0,00038	0,02417	0,10455	0,10465
			150	0,10457	0,08566	0,00027	0,02428	0,11149	0,10446
			210	0,13190	0,08624	0,00244	0,02487	0,11663	0,10346
		45°	90	0,10058	0,08563	0,00621	0,02425	0,12669	0,10451
			150	0,09833	0,08577	0,00103	0,02440	0,12459	0,10426
			210	0,11203	0,08581	0,00272	0,02443	0,11571	0,10421
		60°	90	0,10407	0,08526	0,00483	0,02388	0,12247	0,10513
			150	0,11298	0,08562	0,00400	0,02424	0,12513	0,10453
			210	0,11341	0,08540	0,00388	0,02402	0,12386	0,10490
2	403,3	30°	90	0,09178	0,09341	0,00730	0,01660	0,10903	0,10135
			150	0,09082	0,09356	0,00428	0,01669	0,10684	0,10114
			210	0,09091	0,09428	0,00488	0,01715	0,10958	0,10008
		45°	90	0,09663	0,09352	0,00148	0,01667	0,11661	0,10120
			150	0,09932	0,09370	0,00026	0,01678	0,11149	0,10093
			210	0,09734	0,09374	0,00159	0,01681	0,11241	0,10087
		60°	90	0,09649	0,09306	0,01194	0,01638	0,11743	0,10186
			150	0,10120	0,09351	0,00004	0,01666	0,11663	0,10121
			210	0,09621	0,09323	0,00005	0,01649	0,11768	0,10161
3	564,5	30°	90	0,09933	0,08393	0,00429	0,02572	0,11142	0,10533
			150	0,10132	0,08403	0,01353	0,02584	0,11209	0,10514
			210	0,10916	0,08459	0,01180	0,02646	0,10128	0,10416
		45°	90	0,10451	0,08400	0,00892	0,02581	0,10764	0,10520
			150	0,11224	0,08415	0,01110	0,02597	0,10580	0,10495
			210	0,11041	0,08418	0,00719	0,02600	0,10449	0,10489
		60°	90	0,09811	0,08366	0,00358	0,02543	0,11584	0,10581
			150	0,10630	0,08400	0,01310	0,02580	0,09791	0,10521
			210	0,11400	0,08378	0,02346	0,02557	0,11057	0,10558
4	427	30°	90	0,05950	0,09312	0,00106	0,01689	0,15239	0,10147
			150	0,06946	0,09326	0,00385	0,01698	0,14350	0,10127

			210	0,07910	0,09398	0,00031	0,01744	0,13351	0,10021
		45°	90	0,06740	0,09322	0,00158	0,01695	0,15050	0,10132
			150	0,06180	0,09340	0,00269	0,01707	0,16272	0,10106
			210	0,06645	0,09344	0,00126	0,01710	0,14788	0,10100
		60°	90	0,06757	0,09277	0,00078	0,01667	0,14956	0,10198
			150	0,05627	0,09321	0,00224	0,01695	0,15840	0,10134
			210	0,06666	0,09294	0,00138	0,01677	0,15049	0,10174
5	428,9	30°	90	0,09861	0,08820	0,00013	0,02161	0,11211	0,10354
			150	0,10029	0,08833	0,00203	0,02172	0,10881	0,10334
			210	0,10117	0,08895	0,00080	0,02227	0,10893	0,10232
		45°	90	0,10879	0,08829	0,00102	0,02169	0,10257	0,10339
			150	0,10729	0,08845	0,00440	0,02183	0,10542	0,10314
			210	0,10045	0,08849	0,00339	0,02186	0,11002	0,10308
		60°	90	0,09803	0,08790	0,00022	0,02135	0,11140	0,10403
			150	0,09242	0,08828	0,00005	0,02168	0,11683	0,10341
			210	0,08320	0,08805	0,00126	0,02147	0,12543	0,10379

ANEXO J. Potencias suministradas, exceso de aire y pérdidas en las cámaras de combustión

Hornilla	Experimento			kW _{suministrado} /m ³		Exceso de aire		Pérdidas reales (kW)		
	Q (kg/h)	P	F (s)	Real	Simulador	Real	Simulador	MP	Cenizas	Combustión incompleta
1	402	30°	90	313	308	56,770	58,617	0,1983	8,4	2,03
			150	314	308	58,630	58,337	1,03	8,4	1,513
			210	312	309	55,012	56,904	0,16	8,4	10,78
		45°	90	315	308	60,063	58,417	2,226	8,4	34,3
			150	316	308	61,316	58,049	3,66	8,4	6,07
			210	314	308	57,554	57,969	0,45	8,4	14,06
		60°	90	315	307	59,250	59,322	1,5	8,4	26,245
			150	314	308	58,470	58,434	0,93	8,4	20,26
			210	314	308	58,270	58,986	0,8	8,4	19,59
2	403,3	30°	90	292	301	58,653	58,617	0,8	6,47	39,13
			150	293	301	59,230	58,337	1,134	6,47	23,86
			210	293	302	59,495	56,904	1,3	6,47	26,99
		45°	90	293	301	60,400	58,417	1,98	6,47	7,96
			150	293	302	59,492	58,049	1,3	6,47	1,373
			210	293	302	59,640	57,969	1,4	6,47	8,525
		60°	90	292	301	58,080	59,322	0,54	6,47	58,52
			150	293	301	59,984	58,434	1,654	6,47	0,1935
			210	294	301	60,963	58,986	2,48	6,47	0,29

3	564,5	30°	90	312	309	58,550	58,617	1,45	11,865	35,28
			150	310	310	56,180	58,337	0,154	11,865	100,05
			210	309	310	53,565	56,904	0,99	11,865	83,12
		45°	90	310	309	56,041	58,417	0,14	11,865	67,07
			150	309	310	54,096	58,049	0,63	11,865	76,7
			210	309	310	55,033	57,969	0,23	11,865	52,154
		60°	90	313	309	59,577	59,322	2,6	11,865	29,9
			150	308	309	53,040	58,434	1,45	11,865	93,4
			210	308	309	51,940	58,986	2,71	11,865	144,9
4	427	30°	90	296	302	72,130	58,617	25,87	5,27	9,15
			150	291	302	68,320	58,337	15,26	5,27	28,53
			210	289	303	66,197	56,904	10,54	5,27	2,14
		45°	90	293	302	70,060	58,417	19,745	5,27	12,24
			150	296	302	72,010	58,049	25,78	5,27	21,9
			210	293	302	70,087	57,969	19,82	5,27	9,93
		60°	90	293	301	70,140	59,322	19,97	5,27	6,133
			150	298	302	73,100	58,434	29,03	5,27	19,84
			210	294	301	70,260	58,986	20,32	5,27	10,85
5	428,9	30°	90	307	306	59,735	58,617	1,866	8,214	0,805
			150	306	306	58,490	58,337	0,92	8,214	12,05
			210	306	307	58,665	56,904	1,03	8,214	4,76
		45°	90	304	306	56,367	58,417	0,123	8,214	5,656
			150	304	306	56,269	58,049	0,11	8,214	24,04
			210	306	306	58,330	57,969	0,82	8,214	19,87

		90	307	305	59,706	59,322	1,84	8,214	1,36
	60°	150	308	306	61,500	58,434	3,825	8,214	0,345
		210	311	305	64,035	58,986	7,88	8,214	8,94