

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL FLUJO DE AIRE EN LA EFICIENCIA DE
COMBUSTIÓN DE UN HORNO DE LECHO FIJO**

CLARA MILENA ORTIZ PEÑA

ANDRES FERNANDO RAMÍREZ QUINTERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL FLUJO DE AIRE EN LA EFICIENCIA DE
COMBUSTIÓN DE UN HORNO DE LECHO FIJO.**

**CLARA MILENA ORTIZ PEÑA
ANDRES FERNANDO RAMÍREZ QUINTERO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al
Título de
Ingeniero Químico**

**Director de proyecto
HUMBERTO ESCALANTE
Ph.D**

**Co-director
ZAMIR SANCHEZ
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2012

NOTA ACLARATORIA

El presente trabajo de tesis de grado forma parte del proyecto de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA titulado: **Estudio de la Influencia del Flujo de Aire en la Eficiencia de Combustión de un Horno de Lecho Fijo**, 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 mi madre Irma Peña
Que con su amor y esmero
Hizo de mí una mejor persona,
Por mostrarme que con trabajo y dedicación
Se pueden hacer grandes cosas,
Estar a conmigo cada vez que la necesito
Y es gracias a ella que me es posible este logro.*

*A mi hermano Jaime Armando
Que siempre ha sido mi ejemplo a seguir,*

*A mi novio Victor por hacer dulces mis días,
Hacerme sentir especial y porque sé que
Puedo contar con su amor y apoyo.*

*Y por último pero no menos importantes
A mis amigos Ángel, Fredy, Walter, Syndy,
Rosibel, Genner con los que comprobé
Que es cierto que el que encuentra a un amigo
Encuentra un tesoro, yo encontré seis.*

Clara Milena Ortíz Peña.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A **Dios** por permitirnos sacar adelante este proyecto mediante la salud, sabiduría y entendimiento que nos prestó a lo largo de este camino.

A la **Universidad Industrial de Santander** por la oportunidad de acogernos en su tan honorable claustro y formarnos como futuros profesionales aptos para competir en un mundo laboral con una formación impecable.

A **Humberto Escalante**, Ph.D., Director de proyecto de grado, por su orientación, disposición y apoyo durante todo este proceso.

A **Zamir Sánchez**, Ingeniero Químico por su colaboración y ayuda incondicional.

A el **Cimpa** y todos integrantes de este ente como Don Antonio, Don Miguel, Don Ferleyn entre otros, por su ayuda y disposición.

A todas aquellas personas que en medio de toda la investigación nos ofrecieron su compañía y ayuda participando en el desarrollo de la misma.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Combustión de biomásas.....	17
1.2. Proceso de producción de la panela.....	20
1.3. Bagazo de caña (BC).....	21
1.4. Balances de masa y energía para cámaras de combustión de BC.....	21
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	26
2.1. Etapa 1: Determinación de los frentes de secado, ignición y oxidación de carbonizado.	27
2.2. Etapa 2: Cálculo de las tasas de combustión y eficiencias de combustión.	28
2.3. Etapa 3: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.	28
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
3.1. Etapa 1: Frentes de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.....	29
3.1.1. Identificación de las etapas.....	32
3.2. Etapa 2: Cálculo de las tasas de combustión y eficiencias de combustión.	34
3.2.1. Tasa de combustión (TC).....	34
3.3. Etapa 3: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.	38
4. CONCLUSIONES	43
5. BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS.....	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de una Hornilla Panelera.	20
Figura 2. Esquema cámara de combustión de BC.....	22
Figura 4. Perfiles de temperatura y composición de los gases en función del tiempo para combustión de BC.....	29
Figura 5. Identificación de las etapas de combustión en el lecho de bagazo (FAP 0,25 kg/m ² s y FAS 0,25 kg/m ² s).....	33
Figura 6. a. Tasa de Combustión en función del FAP y FAS. b. Temperatura máxima en el lecho función del FAP y FAS.	34
Figura 7. Tasa de Combustión del BC en función de Rprimaria.	35
Figura 8.a. Eficiencia de combustión en cámara primaria en función de los flujos de aire. b. Eficiencia de combustión en cámara secundaria en función de los flujos de aire.	36
Figura 9. Diagrama de Pareto para la tasa de combustión de BC.....	38
Figura 10. Diagrama de Pareto para eficiencia primaria de combustión de BC.....	39
Figura 11. Diagrama de Pareto para eficiencia secundaria de combustión de BC.....	40
Figura 12. a. Efectos principales sobre la tasa de combustión. b. Efectos principales sobre la eficiencia primaria. c. Efectos principales sobre la eficiencia secundaria.	41

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelos para capacidad calorífica de los gases de combustión [González, 2010].....	24
Tabla 2. Pruebas del diseño de experimental para determinar la influencia de los flujos de aire sobre la eficiencia de combustión de BC.....	27
Tabla 3. Perdidas por inquemados y combustión incompleta en el horno.	37
Tabla 4. Análisis de varianza para tasa de combustión.	38
Tabla 5. Análisis de varianza para eficiencia primaria de combustión.	39
Tabla 6. Análisis de varianza para eficiencia secundaria de combustión.	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Materiales y equipos utilizados.	47
ANEXO B. Descripción e las pruebas.....	48

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL FLUJO DE AIRE EN LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE UN HORNO DE LECHO FIJO.*

AUTORES: Andrés Fernando Ramírez Quintero, Clara Milena Ortiz Peña.**

PALABRAS CLAVE: Cámara WARD-CIMPA, combustión de bagazo, secado, devolatización, combustión de carbonizado.

La panela tiene un lugar sobresaliente dentro de la sociedad colombiana donde es considerada indispensable dentro de la canasta familiar y de alto valor nutricional. Durante el proceso de producción de panela, la caña de azúcar se muele liberando los jugos y dejando un residuo conocido como bagazo. Los jugos son procesados en una hornilla que utiliza como combustible el mismo bagazo residual de la molienda, y el calor generado se emplea en las etapas posteriores del proceso.

Bajo condiciones de diseño adecuadas el bagazo suministra la energía necesaria para suplir los requerimientos energéticos sin embargo en la práctica la eficiencia energética de una hornilla panelera no supera el 48%, por este motivo es necesario emplear combustibles alternativos como la madera y llanta que generan contaminación por deforestación y liberación de gases contaminantes como el SO_2 . Este problema se puede contrarrestar operando con flujos de aire más adecuados

En este trabajo se plantea el estudio de los frentes de ignición, la composición de los gases, el tiempo total de quemado y temperaturas dentro del horno para determinar la influencia de cada etapa sobre la combustión de bagazo de caña, para diferentes relaciones de flujo de aire. Los resultados de esta investigación podrán mejorar la eficiencia de los procesos de producción panelera y permitirán aprovechar mejor el potencial de esta industria.

*Proyecto de Grado

** Facultad: Ingenierías Físicoquímicas. Escuela: Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Ingeniero Zamir Sánchez Castro.

ABSTRACT

TÍTULO: Study of the influence of air flow on the combustion efficiency of a fixed-bed furnace.*

AUTHORS: Andres Fernando Ramírez Quintero, Clara Milena Ortiz Peña.**

Key Words: Combustion chamber WARD- CIMPA, combustion of bagasse, drying, devolatilization, Combustion of Carbonized.

The panela (unrefined sugar product) has an outstanding and important place within colombian society where it's considered essential for the basket-market because of its high nutritional value. During the panela production the sugarcane is ground where the juices are released and the bagasse is obtained as a residue. The juices are processed in a burner where the residual bagasse obtained from the sugarcane grist is used as fuel and the heat generated is utilized in the later stages of the process.

Under suitable design conditions, the bagasse can provide energy to supply the energy requirements, however the energy efficiency of a burner couldn't exceed the 48% in practice, therefore, it is necessary to use alternative fuels such as wood and tire that generate pollution from deforestation and release of pollutant gases such as SO_2 . This problem can be countered by operating with adequate air flow.

This paper presents the study of ignition front, the gasses composition, the total burning time and the internal oven temperature with the aim to determine the influence of each stage on the sugarcane combustion for different air flow ratios.

The results of this investigation could improve the efficiency processes of panela production and to take advantage on this specific industry.

*Grade Proyect.

** Facultad: Ingenierías Físicoquímicas. Escuela: Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Ingeniero Zamir Sánchez Castro.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es el segundo productor mundial de panela después de la India y cuenta con una participación en el mercado de 12%. El país es también el primer consumidor mundial de panela por habitante con 34,2 kg al año. Se estima que existen 20.000 trapiches en el país alrededor de los cuales trabajan entre productores y procesadores unas 370.000 personas [García y Gordillo, 1992]. En la economía aporta el 3,5% del PIB agrícola del país [García y Albarracín(2006)].

Durante el proceso de producción de panela, la caña de azúcar se muele liberando los jugos y dejando un residuo conocido como bagazo. Los jugos son procesados en una hornilla que utiliza como combustible el mismo bagazo residual de la molienda [García y Albarracín, 2006]. Debido a la baja eficiencia energética de las hornillas (48%) el bagazo no cubre la demanda energética del proceso [Gonzales, 2010]. Se utilizan en promedio 0,511 toneladas de madera y 0,231 toneladas de llantas por tonelada de panela producida [Rodríguez, 2011]. La deforestación ha sido severa en algunas zonas y se calcula que se consumen 1'000.000 toneladas de madera anualmente [García y Gordillo, 1992]. El consumo de llanta produce 2,8 toneladas de humos secos a la atmósfera, con 0,639 toneladas de CO₂ y 9,25 Kg de SO₂ por tonelada de panela [Red Institucional de Tecnologías, 2012].

Las cámaras de combustión para BC más desarrolladas en la actualidad son las WARD-CIMPA. En este tipo de cámaras el aire requerido para la combustión se suministra en dos corrientes; el aire primario correspondiente al 70 % del volumen de diseño, se alimenta a través de la parrilla donde se soporta el bagazo. El 30 % restante se suministra por una corriente secundaria ubicada sobre el nivel del lecho de BC. El flujo de aire secundario permite oxidar parte de los compuestos volátiles y el monóxido de carbono presentes en los gases de combustión provenientes del lecho [García y Gordillo, 1992]. Este tipo de cámaras presentan mayor estabilidad de temperaturas y potencia, se libera la menor cantidad de CO

(1% en promedio), permite utilizar bagazo con humedad de hasta el 45% y alcanza mayores eficiencias comparadas con las tradicionales [Rojas y Castellanos, 2010].

El suministro de aire a los hornos de lecho fijo es uno de los factores que más afecta las tasas de combustión y las eficiencias energéticas [Castells, 2005]. En las hornillas paneleras el aire es suministrado por tiro natural, sin ningún control de esta variable, ocasionando operaciones inestables.

Empíricamente se han ajustado las hornillas para trabajar en un rango amplio de excesos de aire (entre 40 y 60%) [Gonzales y Gordillo, 1992], sin embargo no existe un estudio preciso sobre el tema. Por el anterior motivo el objetivo del presente trabajo fue establecer la influencia de los flujos de aire primario (FAP) y secundario (FAS) sobre la combustión de bagazo de caña (BC) en un horno de lecho fijo. Las variables de respuesta evaluadas fueron la tasa de consumo del BC y la eficiencia de combustión.

1.1. Combustión de biomásas.

La combustión de biomásas en lecho fijo se lleva a cabo en tres etapas: secado, devolatilización y oxidación de carbonizado. Cada una de estas etapas ocurre como frentes que se desplaza en el lecho de combustible [Niessen, 2002]. La propagación de cada frente ocurre en contracorriente del flujo de aire primario y posee una temperatura característica.

Dentro del combustible puede encontrarse agua, y esta agua puede ser parte estructural, agua retenida por fuerzas capilares o vapor de agua. La primera etapa es el secado del agua que ocurre a temperaturas cercanas a los 100°C [Porteiro *et al*, 2010]. Además de carbono la biomasa contiene compuestos volátiles (CO, CO₂, H₂, CH₄, C_xH_y, CH_mO_n y otros oligoelementos) que también pueden ser oxidados [Niessen, 2002]. Al finalizar el secado inicia la etapa de descomposición térmica entre 250 y 650 °C [Loo y Koppejan, 2008]. Los volátiles liberados

reaccionan con el oxígeno circundante formando una llama, por este motivo el frente de devolatilización también es conocido como frente de ignición [Porteiro *et al*, 2010]. Por último el material carbonizado reacciona con el oxígeno por encima de los 650°C [Miller y Tillman, 2007]. La velocidad de quemado en esta etapa depende de la velocidad de reacción entre el carbono y el oxígeno, y la velocidad de difusión del oxígeno hasta la partícula [Loo y Koppejan, 2008].

Dependiendo de FAP los frentes pueden desplazarse secuencial o simultáneamente. Estudios sobre combustión de madera Yang *et al* (2006) y paja Khoret *al* (2007) en lecho fijo han demostrado que para flujos de aire por debajo de 0,13 kg/m²s los frentes de ignición y oxidación de carbonizado ocurren separadamente. Para flujos de aire elevados existe suficiente oxígeno disponible para la oxidación de volátiles y carbonizado, ocasionando que los dos frentes se muevan juntos [Khoret *al*, 2007]. La velocidad de propagación de cada frente se define a partir de la ecuación 1 [Van der Lans *et al*, 200].

$$V_f = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde Δx es la distancia entre dos termocuplas adyacentes y Δt el tiempo que tarda el frente en moverse entre ellas. El Δt se determina directamente de los perfiles de temperaturas en el lecho. Cada frente posee una temperatura característica que es función de la biomasa utilizada [Ryue *et al*, 2005]. La velocidad del frente es afectada por la geometría de partícula y la porosidad del lecho [Yang *et al*, 2006]. Por este motivo normalmente se define una variable independiente de estos factores denominada tasa de propagación de frente (ecuación 2) [Yang *et al*, 2006]. La tasa de propagación de los frentes se calcula con la ecuación 2.

$$\text{Tasa de propagación} = V_f \times \rho_i \quad (2)$$

Donde ρ_i es la densidad aparente inicial. Las tasas a las que se propaga cada frente son una medida de la tasa de combustión del BC (r_{BC}) como lo indica la ecuación 3 [Zhou *et al*, 2005].

$$r_{BC} = ar_{sec} + br_{ign} + cr_{oxi}(3)$$

Donde a, b y c son las fracciones de masa pérdidas durante las etapas de secado, devolatilización y oxidación de carbonizado respectivamente. r_{sec} , r_{ign} y r_{oxi} , son las tasas de propagación de los tres frentes.

La tasa de combustión de biomasa en lecho fijo puede presentar tres zonas en función del flujo de aire primario. La primera zona es limitada por la cantidad de oxígeno, por tal motivo la tasa de combustión aumenta linealmente con el flujo de aire. La segunda zona está limitada por la cinética intrínseca de las reacciones de oxidación. Por esto la tasa de combustión permanece constante independiente del flujo de aire suministrado. Si el suministro de aire aumenta por encima de la segunda zona ocurre un enfriamiento del lecho. Si el calor liberado en la combustión es menor al retirado por convección ocurre la extinción del lecho [Yang *et al*, 2005].

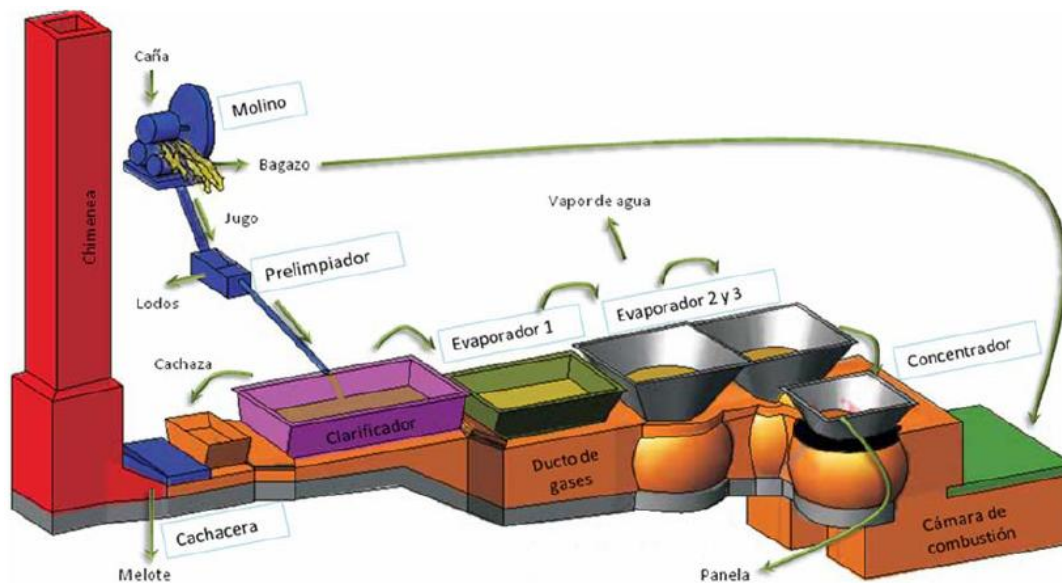
Las principales pérdidas energéticas durante la combustión de BC son: pérdidas por combustión incompleta, perdidas por material no quemado y pérdidas por evaporación de la humedad [González, 2010]. Durante la combustión de paja el aumento del flujo de aire entre 0,194 y 0,25 kg/m²s disminuye la cantidad de carbono no quemado en cenizas [Khoret *al*, 2007]. Sin embargo estudios sobre BC han demostrado que excesos de aire por encima de 56%, aumenta las pérdidas de material por arrastre en chimenea [Rojas y Castellanos, 2010].

En estudios anteriores la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), ha encontrado que el mejor rango de exceso de aire para una cámara Ward-Cimpa está entre 50 y 60%. Excesos de aire por debajo de este rango aumentan las pérdidas por combustión incompleta, mientras excesos superiores aumentan la cantidad de material no quemado [González, 2010]. Por otra parte los excesos de aire disminuyen las temperaturas de combustión afectando las etapas de transferencia de calor [Porteiro *et al*, 2010].

1.2. Proceso de producción de la panela.

El proceso de producción de panela consta de 6 etapas (ver Figura 1). Inicialmente los jugos son extraídos en la etapa de molienda, por medio de molinos mecánicos. El jugo es pasado por un prelimpiador para retirar impurezas gruesas. Del prelimpiador los jugos crudos son llevados a la paila clarificadora, donde por medio de un aglutinante vegetal se retiran los sólidos solubles. Posteriormente los jugos son conducidos a las etapas de evaporación y concentración, donde aumentan la cantidad de sólidos solubles desde 18°B hasta 94°B (punto de panela) [García y Gordillo, 1992]. Por último la panela es batida, moldeada y empacada para su distribución.

Figura 1. Esquema de una Hornilla Panelera.



Fuente: Guía Tecnológica para el Manejo Integral Productivo del Sistema de Caña Panelera, 2007.

Las etapas de clarificación, evaporación y concentración se realizan en un horno denominado hornilla panelera. La hornilla consta de tres zonas (ver Figura 2): i) cámara de combustión, donde se quema el bagazo de caña, ii) ducto de humos, el cual conduce los gases de combustión y los pone en contacto con las pailas, y iii)

la chimenea que se encarga de producir el tiro natural para el suministro de aire al horno. Los estilos más comunes para cámaras de combustión de hornillas paneleras son el tradicional, tradicional mejorado, el tipo Ward y el tipo Ward-Cimpa [García y Albarracín, 2007].

1.3. Bagazo de caña (BC).

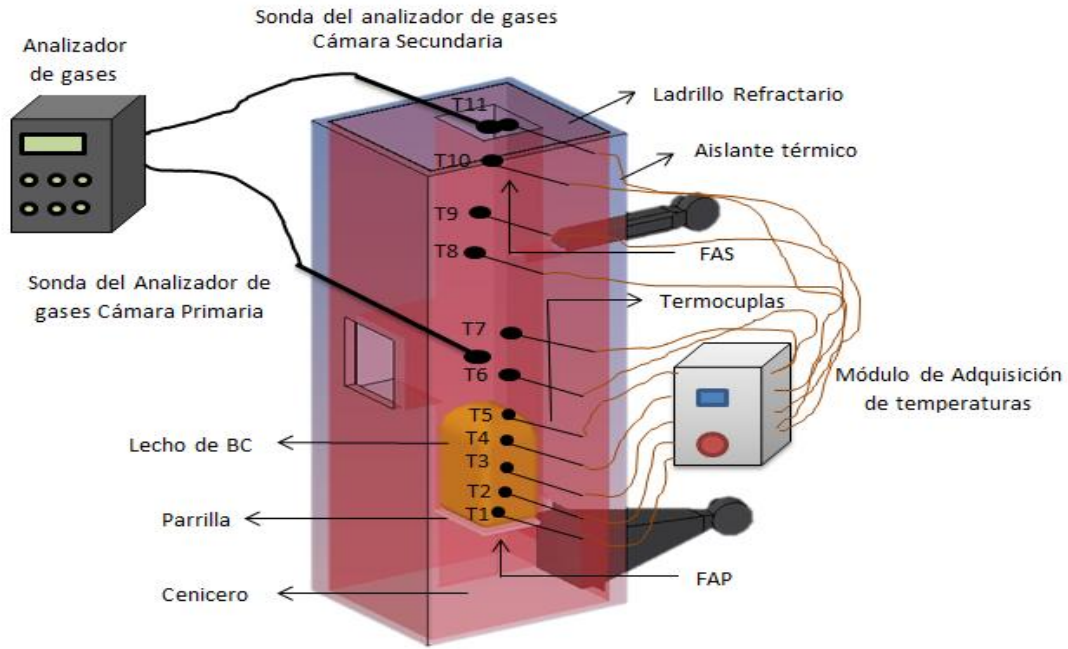
El BC es un material fibroso lignocelulósico y está constituido por 3 fracciones principales; celulosa 20 – 40%, hemicelulosa 25 – 50% y lignina 10 – 30% [Soler y Gómez, 2004]. El BC de azúcar tiene un poder calorífico inferior de 19374,24kJ/kg [Rojas y Castellanos, 2010]. El contenido de humedad afecta el poder calorífico de forma inversamente proporcional. El BC se somete a secado en las bagaceras y su contenido final de humedad depende del tiempo de secado y de las condiciones ambientales de la zona [Días, 2008].

El interés por utilizar el BC de caña para la producción energética es por su alto rendimiento de 80 ton/ha, superior incluso a la madera que presenta rendimientos de 20 ton/ha [Red Institucional de Tecnologías, 2010]. La composición elemental del BC depende de las condiciones de cultivo y de la variedad de caña. Para el presente trabajo se utilizó una composición promedio de: 47% Carbono, 44% Oxígeno, 6,5% Hidrógeno y 2,5% cenizas [González, 2010].

1.4. Balances de masa y energía para cámaras de combustión de BC.

En la Figura 2 se muestra un esquema de un horno Ward-Cimpa para combustión de BC. El horno está dividido en dos cámaras: una primaria entre la parrilla y el aire secundario, y una secundaria hasta la salida de los gases. Debido a la entrada del aire secundario, los balances de masa y energía se realizan para cada cámara.

Figura 2. Esquema cámara de combustión de BC.



Fuente: Autores

Balance elemental de Carbono

$$\frac{x_C r_{BC}}{PM_C} = G y_{CO} + G y_{CO_2} \quad (4)$$

Balance elemental de Hidrógeno

$$\frac{x_H r_{BC}}{PM_H} = 2 \times (H_2O)_{formado} \quad (5)$$

Balance elemental de Nitrógeno

$$0,79 A = G y_{N_2} \quad (6)$$

Balance elemental de Oxígeno

$$\frac{0,44 r_{BC}}{PM_O} + 2(0,21A) = 2G y_{CO_2} + 2G y_{O_2} + (H_2O)_{formado} \quad (7)$$

Fracción molar

$$1 = y_{CO_2} + y_{CO} + y_{N_2} + y_{O_2} \quad (8)$$

Donde:

PM_i = Peso molecular del compuesto i (kg/kmol).

Y_i = Fracción molar del compuesto i en los gases de combustión.

x_i = Fracción molar del elemento i en una mol de BC.

G = Flujo molar de gases de combustión secos (kmol/m²s).

$(H_2O)_{formada}$ = Flujo molar de agua formada (kg/m²s).

A = Flujo molar de carbono inquemado (kmol/m²s).

Balance de energía

El balance de energía general para cada subcámara está definido como indica la ecuación 9.

$$Q_{BCs} + Q_a + Q_{rx} = Q_g + Q_{pp} + Q_{\xi s} + Q_{si} \quad (9)$$

Donde Q_{BCs} es el calor ingresado al sistema por el bagazo (kJ/m²s), Q_a calor ingresado al sistema por el aire (kJ/m²s), Q_{rx} es el calor de combustión (kJ/m²s), Q_g es el calor retirado del sistema por los gases de combustión (kJ/m²s), Q_{pp} es el calor sensible perdido por las paredes (kJ/m²s), $Q_{\xi s}$ es el calor sensible perdido en cenizas (kJ/m²s) y Q_{si} es el calor sensible perdido en inquemados (kJ/m²s) .

El bagazo de caña y el aire entran a temperatura ambiente (temperatura de referencia) por esta razón Q_{BC} y Q_a se cancelan de la ecuación 9. El horno de pruebas tiene un recubrimiento de fibra de vidrio, de esta manera las perdidas por las paredes Q_{pp} son despreciables. En todas las pruebas realizadas se quemó todo el material cargado en la prueba de tal manera que las perdidas por inquemados Q_{si} son 0.

Reemplazando en la ecuación 9 las capacidades caloríficas de cada sustancia.

$$Q_{rx} = G \int_{T^0}^{T_{25^0}} C_{p_g} dT + \xi \int_{T^0}^{T_{25^0}} C_{p_\xi} dT \quad (10)$$

Donde ξ es la cantidad de cenizas (kg/s), C_{p_g} es la capacidad calorífica de los gases de combustión (kJ/kg K), C_{p_ξ} es la capacidad calorífica de la ceniza (kJ/kg K), T^0 es la Temperatura de referencia para los cálculos (K) y T_{25^0} es la Temperatura ambiente (K). Para C_{p_ξ} se utiliza un valor promedio en el rango de temperaturas igual a 0,75827 kJ/kg K [García y Gordillo, 1992]. Los modelos de las capacidades caloríficas para cada una de las especies presentes en los gases de combustión se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos para capacidad calorífica de los gases de combustión [González, 2010].

Especie	Cp[kJ/kg K]
	T [K]
N ₂ , CO	1,028 + 0,0000919 * T
CO ₂	0,832 + 0,0003428 * T
H ₂ O	1,956 + 0,0006479 * T
O	0,895 + 0,0000752 * T

Por último la eficiencia de combustión (η) se calcula como la relación entre el calor liberado durante la combustión y el máximo que se podría obtener [García y Gordillo, 1992].

$$\eta = \left(\frac{Q_{rx}}{Q_{BC}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$Q_{BC} = PCI \times r_{BC} \quad (12)$$

Donde Q_{rx} (kJ/m²s) es el calor liberado durante la combustión del BC, Q_{BC} (kJ/m²s) es su energía potencial química, PCI su poder calorífico inferior y r_{BC} es la tasa de combustión de BC (kg/m²s)

Las pérdidas por material inquemado ($P_{Inquemados}$) y las pérdidas por combustión incompleta (P_{CO}) se calcularon con ayuda de las ecuaciones 13 y 14 respectivamente [González, 2010].

$$P_{Inquemados} = \frac{Q_{\xi}}{PCI \times B} (13)$$

$$P_{CO} = \frac{Q_{CO}}{PCI \times B} (14)$$

Donde Q_{ξ} y Q_{CO} son el calor perdido debido a la no reacción del carbono inquemado en cenizas y el calor perdido por combustión incompleta, respectivamente. Q_{CO} se calcula con la ecuación 15 [González, 2010].

$$Q_{CO} = \text{moles de CO} \times (\Delta H_{fCO_2}^o - \Delta H_{fCO}^o) (15)$$

Donde $\Delta H_{fCO_2}^o$ es la entalpia de formación de CO₂ (-393509 kJ/kmol) y ΔH_{fCO}^o es la entalpia de formación de CO (-110525 kJ/kmol) y moles de CO en unidades de kmol/m²s.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron en un horno prototipo Ward-Cimpa ubicado en el Centro de Investigación Para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA), en el municipio de Barbosa- Santander. La geometría del horno es rectangular de 0,3 m x 0,3 m x 2,20 m. Las paredes poseen un grosor de 0,2 m y están recubiertas con aislante térmico de fibra de vidrio. La entrada para aire secundario se realiza a través de dos orificios de 0,05 m de diámetro (Figura 2). El aire se suministró por medio de dos ventiladores centrífugos con potencia variable.

Las temperaturas en el lecho fueron censadas por 6 termocuplas tipo K ubicadas axialmente a una profundidad de 0,15 y 0,1 m entre ellas. Las termocuplas estuvieron conectadas a un módulo de adquisición de datos que registro las temperaturas cada 10 segundos. La composición de CO, CO₂ y O₂ en los gases de combustión se determinó con un analizador de gases portátil marca TESTO 350 XL, con capacidad de lectura cada 5 segundos. El análisis se realizó en dos puntos: sobre el lecho de BC y a la salida del horno.

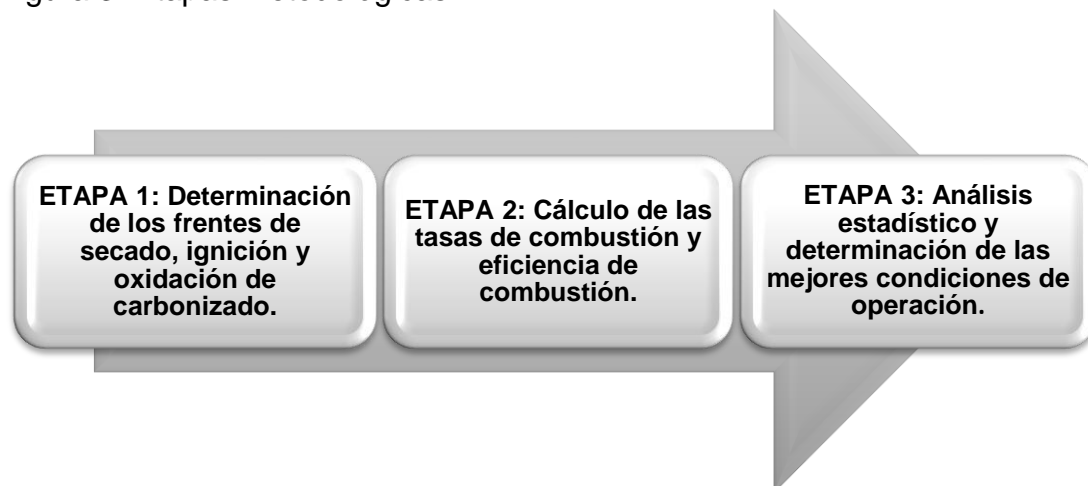
El flujo de aire primario (FAP) se evaluó en: 0,25, 0,53 y 0,75 kg/s por m² de parrilla, mientras el aire secundario (FAS) se trabajó en: 0,25 y 0,84 kg/s-m². Se cargaron 1,7 kg de bagazo, el tamaño de partícula del BC de caña se mantuvo constante en 5 mm y la humedad en 10%. La prueba inició en el momento en que se igniciaba el bagazo, se censaron temperatura y concentración durante todo el proceso de combustión y Se finalizaron las pruebas cuando todas las termocuplas alcanzaron una temperatura inferior a 60 °C. Para el análisis de los resultados se realizó un diseño factorial 3 x 2 por duplicado (tabla 2). Una descripción detallada de las pruebas se presenta en el Anexo B.

Tabla 2. Pruebas del diseño de experimental para determinar la influencia de los flujos de aire sobre la eficiencia de combustión de BC.

Prueba	FAP (kg/m ² s)	FAS (kg/m ² s)
1	0,25	0,25
2	0,25	0,84
3	0,53	0,25
4	0,53	0,84
5	0,75	0,25
6	0,75	0,84

Para determinar la influencia de los flujos de aire en la combustión de bagazo de caña en lecho fijo se establecieron las siguientes etapas: i) Determinación de los frentes de secado, ignición y oxidación de carbonizado. ii) Cálculo de las tasas de combustión y eficiencias de combustión. iii) Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación (ver Figura 3).

Figura 3. Etapas Metodológicas.



Fuente: Autores

2.1. Etapa 1: Determinación de los frentes de secado, ignición y oxidación de carbonizado.

La determinación de los frentes se realizó analizando los perfiles de temperaturas y composición en el lecho de BC. Para cada termocupla se identificaron los puntos de inflexión los cuales permitieron establecer los rangos en que se presentan las etapas de secado, ignición y oxidación de carbonizado.

2.2. Etapa 2: Cálculo de las tasas de combustión y eficiencias de combustión.

La tasa de propagación de cada frente se calculó con la ecuación 2. Con las tasas de propagación de cada frente se calculó la tasa de combustión del BC por medio de la ecuación 3 en la cámara primaria y en la cámara secundaria del horno. Para obtener las eficiencias de combustión y las pérdidas energéticas por el horno se desarrollaron los balances de masa y energía descritas en la sección 1.4. Para determinar la eficiencia de combustión se utilizó la ecuación 11. Se calculó la eficiencia de combustión en la cámara primaria y en la cámara secundaria para cada prueba. Para calcular las pérdidas por material inquemado y las pérdidas por combustión incompleta se utilizaron las ecuaciones 13 y 14 respectivamente.

2.3. Etapa 3: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.

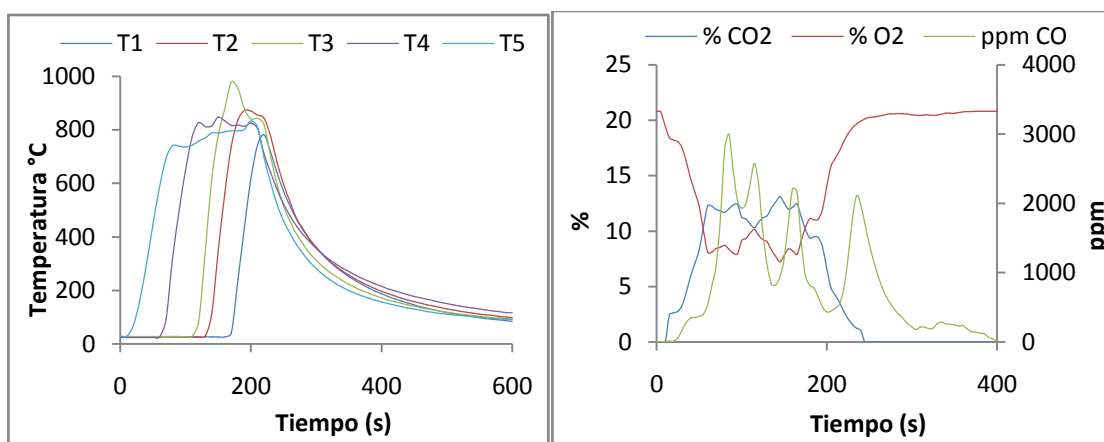
Utilizando los valores encontrados para la tasa de combustión se evaluó la influencia de los flujos de aire sobre la variable de respuesta. Las mejores condiciones de operación se determinaron a partir de los datos de eficiencia de combustión secundaria.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

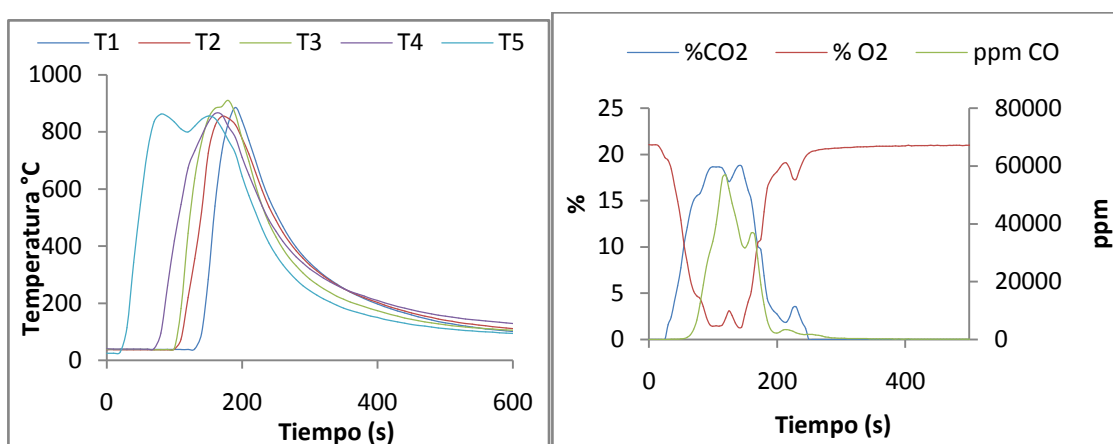
3.1. Etapa 1: Frentes de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.

En la Figura 4 se representa los perfiles de temperatura y concentración de los gases de combustión reportados en el lecho para cada una de las pruebas.

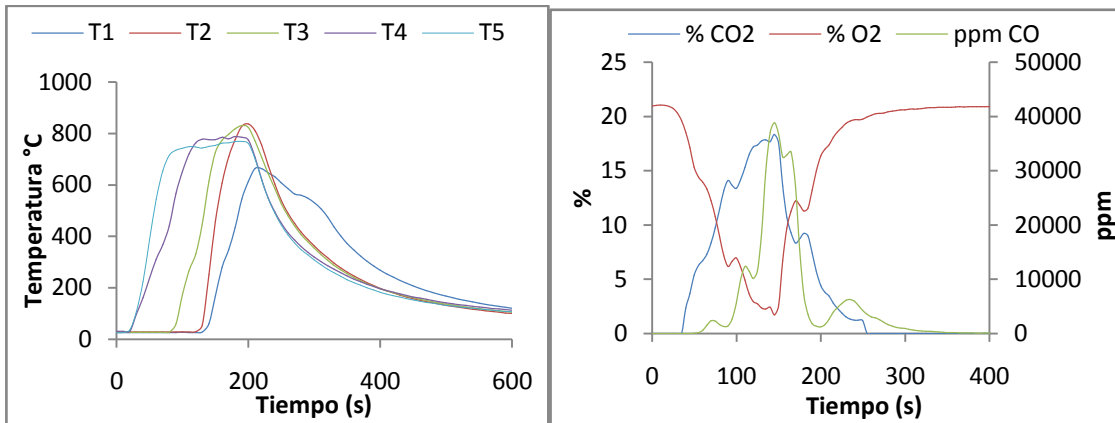
Figura 4. Perfiles de temperatura y composición de los gases en función del tiempo para combustión de BC.



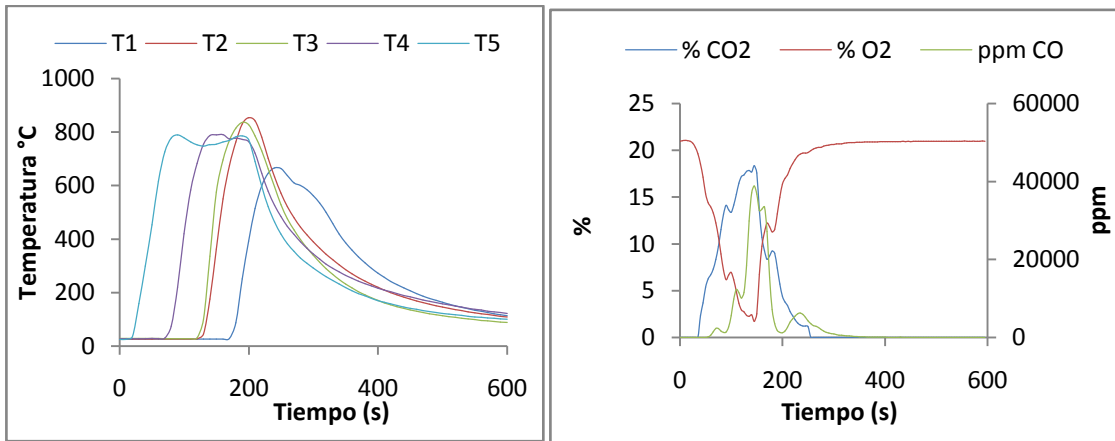
a. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,75 kg/ m² s y FAS= 0,84 kg/ m² s.



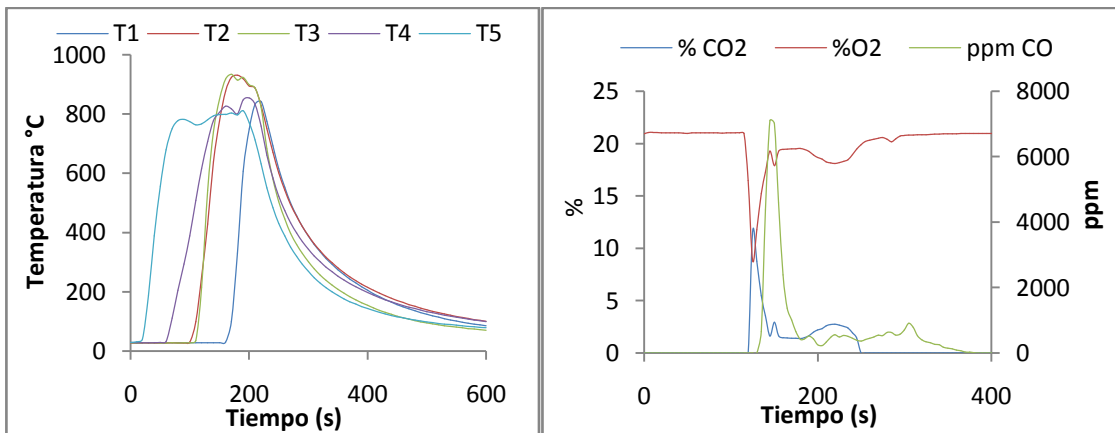
b. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,53 kg/ m² s y FAS= 0,84 kg/ m² s.



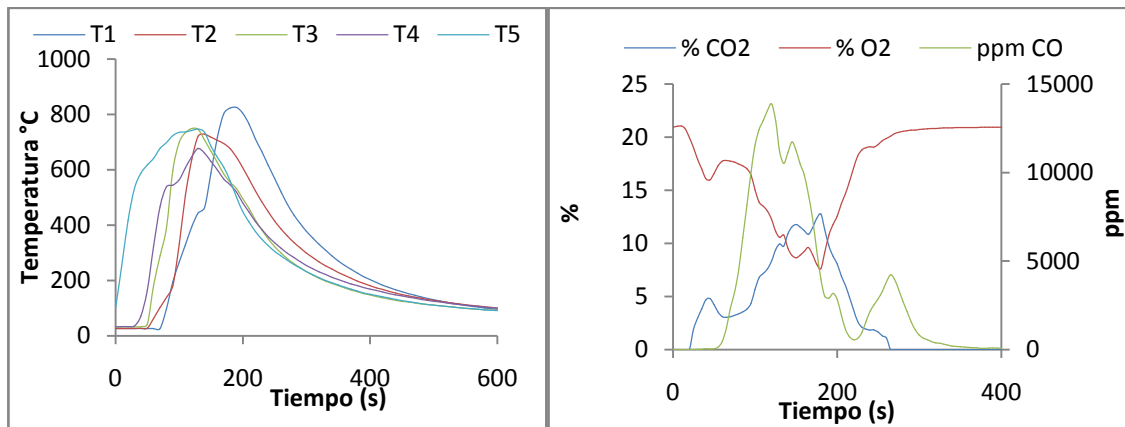
c. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,25 kg/ m² s y FAS= 0,84 kg/ m² s.



d. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,75 kg/ m² s y FAS= 0,25 kg/ m² s.



e. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,53 kg/ m² s y FAS= 0,25 kg/ m² s.



f. Perfil de temperatura y concentración de gases FAP= 0,25 kg/ m² s y FAS= 0,25 kg/ m² s.

Fuente: Autores

En la Figura 4a. el pico de temperatura fue de 937 °C y tardó 170 s en subir de la temperatura ambiente a su valor máximo. Las concentraciones de gases muestran que a los 165 s se alcanzó el máximo valor de %CO₂ con 9,53%, en este experimento se reportó el menor valor ppm de CO llegando hasta 2126 ppm. Para Figura 4b. el pico de temperatura fue 931°C y se encontró a los 160 s en, los datos de gases reportaron que a los 140s se alcanza el valor máximo de %CO₂ con 18,77%. Esta prueba arrojó el valor más alto de %CO₂ y el mayor valor de ppm de CO en el pico de concentración con 56004 ppm. Se observa en la Figura 4c. que el pico de temperatura fue de 830°C y tardo 180 s en llegar a dicho valor. El %CO₂ máximo del experimento fue 18,36% se alcanzó a los 145s, las ppm de CO máximas en este caso fueron 8760 ppm. En la Figura 4d. el pico de temperatura fue 881°C y tardó 200 s en llegar al valor máximo, el %CO₂ máximo del experimento fue 18,36% y se alcanzó a los 145s. Las ppm de CO máximas en este caso fueron 38863 ppm. Para la Figura 4e. el pico de temperatura fue 981 °C y se presenta a los 190 s, el %CO₂ máximo del experimento fue 11,59 % y se alcanzó a los 125 s. Las ppm CO máximas alcanzadas en esta prueba fueron 7104 ppm. Se observa en la Figura 4f. el pico de temperatura fue 943 °C y tardó 170 s en alcanzarlo. El % CO₂ máximo del

experimento fue 12,75% y se alcanzó a los 175 s, el pico de concentración de CO alcanzo 13876 ppm.

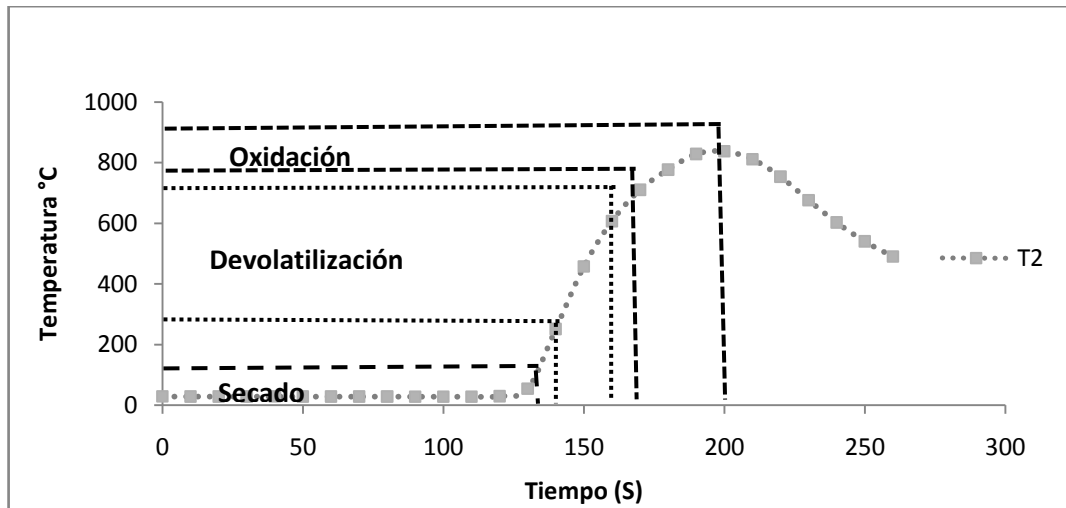
A medida que el frente de flama avanza y se estabiliza en el lecho, las concentraciones de CO₂ y CO comienzan a aumentar, mientras la concentración de O₂ disminuye. En todos los casos la concentración de CO₂ alcanzada superó el 15%, mientras el CO tuvo una gran variación entre 6.000 y 50.000 ppm. Un poco después de los 200 segundos de iniciadas las pruebas, el frente llega a la parte baja del lecho la combustión. En este punto las concentraciones de CO₂ y CO disminuyen a cero, y el O₂ alcanza sus condiciones ambientales (21%).

Cuando el frente de flama llegó a cada termocupla la temperatura aumentó rápidamente entre 700 y 950°C. En todos los experimentos se observó un solo pico en cada termocupla, indicando que los flujos de aire son suficientes para que la oxidación de volátiles y carbonizado ocurra simultáneamente. Resultados similares han sido reportados para paja de 30- 40 mm con flujos de aire de 0,325 kg/m² s [Khoret *al*, 2006] y madera de pino 20 mm con flujo de aire de 0.1 kg/ m² s [Ryuet *al*, 2005]. Cuando el frente abandona la termocupla, la temperatura empieza a disminuir lentamente, por el calor arrastrado por los gases de combustión y el transferido a las paredes internas.

3.1.1 Identificación de las etapas.

Para la identificación de los frentes se debe tener en cuenta que el comportamiento de cada termocupla dentro del lecho es muy similar pero desfasado en el tiempo. Esto ocurre porque las etapas de combustión se van desplazando desde la parte superior del lecho hasta la parrilla. El inicio de cada etapa se caracteriza por un cambio en la pendiente de la curva temperatura versus tiempo [Zhouet *al*, 2004]. En la Figura 5 se puede identificar las diferentes etapas para el BC.

Figura 5. Identificación de las etapas de combustión en el lecho de bagazo (FAP 0,25 kg/m²s y FAS 0,25 kg/m²s).



Fuente: Autores

Inicialmente ocurre la etapa de secado entre los 25 °C (temperatura ambiente) y los 100°C, temperatura a la cual la curva presenta su primer punto de inflexión. Posteriormente el lecho se calienta a una gran velocidad hasta el inicio de la etapa de devolatilización que se presenta entre los 250 y 650 °C. En esta etapa el perfil de temperatura es una línea recta con una pendiente positiva muy alta. Por último entre los 700 y los 950°C se observa un cambio de pendiente de la curva, debido a la etapa de oxidación del carbonizado.

En todos los experimentos se observó un solo pico en cada termocupla, indicando que los flujos de aire son suficientes para que la oxidación de volátiles y carbonizado ocurra simultáneamente. El mismo comportamiento fue encontrado por Zhouet al (2004) y Porteiroet al(2010) para combustión de paja y madera respectivamente, sin embargo los tiempos para cada etapa difieren del presente estudio por tratarse de otro tipo de biomasa.

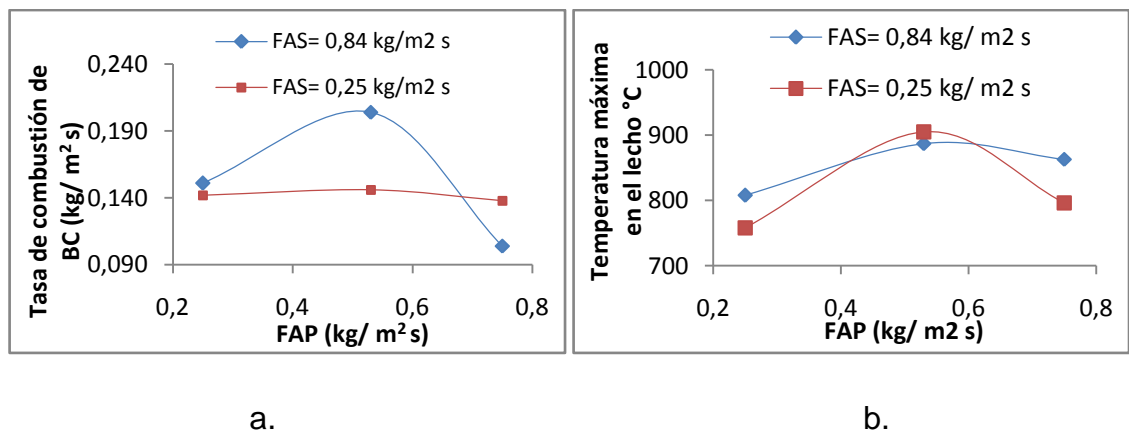
Para las demás termocuplas en el lecho se presentó el mismo comportamiento, pero el inicio de cada etapa ocurrió en tiempos diferentes.

3.2. Etapa 2: Cálculo de las tasas de combustión y eficiencias de combustión.

3.2.1. Tasa de combustión (TC).

En la Figura 6 se presenta el comportamiento de la tasa de combustión y la temperatura máxima en el lecho con respecto al FAP y FAS.

Figura 6. a. Tasa de Combustión en función del FAP y FAS. b. Temperatura máxima en el lecho función del FAP y FAS.



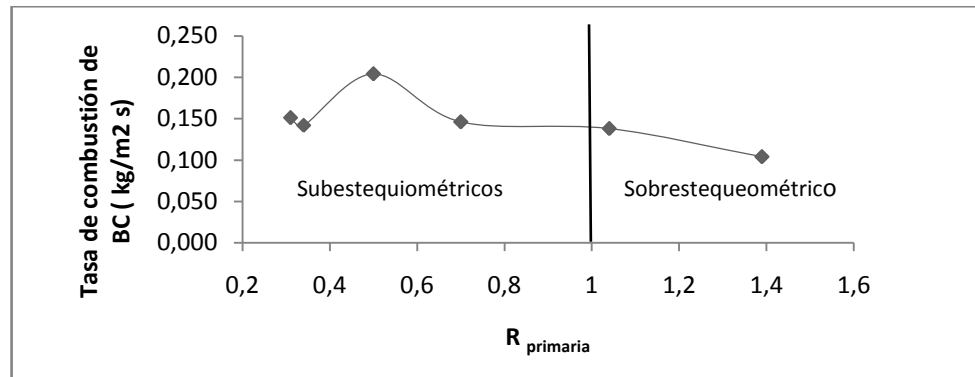
Fuente: autores

Se muestra en la figura 6 a. que el comportamiento de la tasa de combustión del BC fue similar en los dos niveles de FAS, alcanzando un máximo con el FAP de 0,53 kg/m²s. Sin embargo las mayor tasa de combustión (0,204 kg/m²s) se consiguió con el FAS de 0,84 kg/m²s. Este comportamiento se puede explicar observando la Figura 6b. Las máximas temperaturas de combustión se consiguen en ambos casos para FAP de 0,53 kg/m²s. Para FAP menores a 0,53 kg/m²s la combustión se desplaza a una zona pobre en oxígeno, causando una reducción en el calor disponible para sostener el secado y la devolatilización. FAP superiores a 0,53 kg/m²s ocasionan un enfriamiento del lecho de BC por convección, disminuyendo la transferencia de calor a las capas subsecuentes del combustible. Este comportamiento parabólico de tasa de combustión con el FAP también ha

sido encontrado para madera, donde el máximo se encontró en un flujo intermedio de $0,226 \text{ kg/m}^2\text{s}$ *Porteiro et al*(2010).

La Figura 7 presenta la tasa de combustión del BC como función de la relación R_{primaria} (FAP real / FAP estequiométrico)

Figura 7. Tasa de Combustión del BC en función de R_{primaria} .



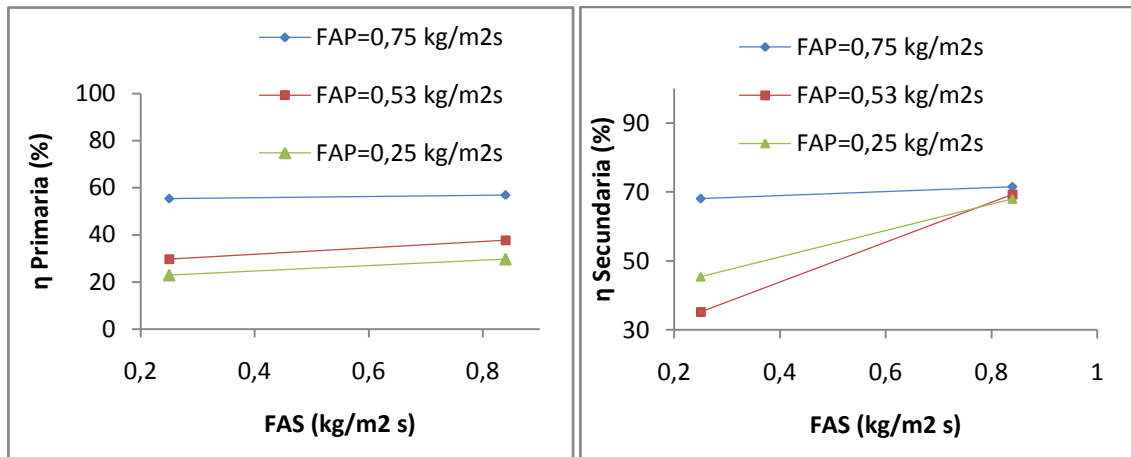
Fuente: Autores

Las mayor tasa de combustión se alcanzaron con $R_{\text{primario}} < 1$ (FAP subestequiométrico). Para un valor de R_{primario} de 0,5 se alcanza tasa de combustión máxima de $0.204 \text{ kg/m}^2\text{s}$. A valores inferiores de 0,5 disminuye la tasa de combustión por deficiencia de oxígeno. A valores superiores cae la tasa de combustión por el enfriamiento por convección con el aire. Este resultado concuerda con el encontrado para madera por *Porteiro et al* (2010), donde la máxima tasa de combustión se encuentra para R_{Primario} de 0,37.

3.2.2. Eficiencia de combustión y pérdidas energéticas.

La Figura 8 presenta la eficiencia de combustión primaria (η_a la salida del lecho) y secundaria (η_a la salida del horno) en función del FAP y FAS.

Figura 8.a. Eficiencia de combustión en cámara primaria en función de los flujos de aire. b. Eficiencia de combustión en cámara secundaria en función de los flujos de aire.



a.

b.

Fuente: Autores

En la figura 8 a. se observa que la eficiencia primaria no fue afectada por el FAS, sin embargo aumenta con el FAP. Para FAP más bajo de la eficiencia primaria fue cercana a 26%. Para FAP medio la eficiencia crece hasta 34% y finalmente alcanza un máximo de 56% para un FAP más alto. Como ya se indicó el aumento del FAP traslada la combustión a zonas ricas en aire ($R_{\text{primaria}} > 1$) logrando una mayor cantidad de carbono y volátiles oxidados. Los estudios realizados por Gonzáles (2010) para combustión de bagazo en cámaras WARD-CIMPA demostraron que el flujo de aire primario está directamente relacionado con la eficiencia térmica del proceso, para excesos de aire $R_{\text{Primaria}} = 1,6$ se alcanza una eficiencia máxima de 73 %, estos resultados concuerdan con el presente estudio.

En la figura 8 b. la eficiencia de combustión secundaria aumenta con el FAS; el efecto es más marcado para FAP menor a $0,75 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Para un FAS de $0,25 \text{ kg/m}^2\text{s}$ la eficiencia secundaria aumenta con el FAP, debido a que la combustión de los volátiles ocurre principalmente con este flujo de aire. Cuando el FAS es de $0,84 \text{ kg/m}^2\text{s}$ la eficiencia se mantiene constante en 70%, independiente del FAP.

Este comportamiento se debe a que la combustión de los volátiles ocurre casi en su totalidad con el FAS.

Tabla 3. Pérdidas por inquemados y combustión incompleta en el horno.

R_{total}	$\eta_{secundaria}$ (%)	Pérdidas por combustión incompleta (%)	Pérdidas por Inquemados (%)
2,37	71,50	0,36	26,80
1,29	69,30	2,31	27,03
1,39	68,00	1,38	29,30
0,96	35,20	1,31	62,10
0,68	45,40	0,32	52,90

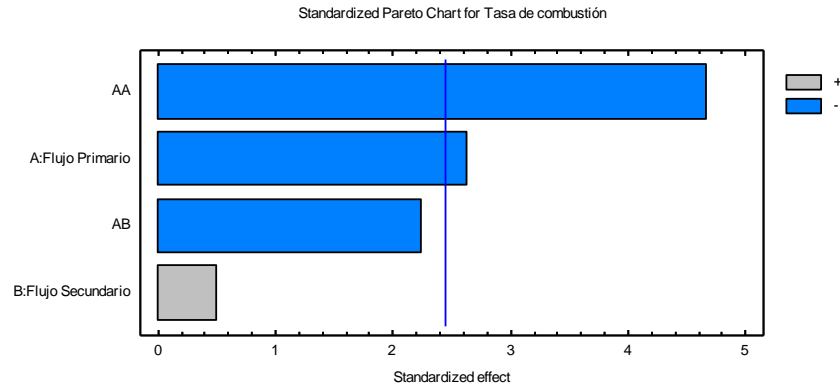
La Tabla 3 presenta las pérdidas por inquemados y combustión incompleta, para diferentes valores de R_{total} (flujo de aire total/flujo de aire estequiométrico). Las mayores pérdidas energéticas se deben a material inquemado tanto en cenizas como el arrastrado por los gases de chimenea. A medida que el exceso de aire aumenta las pérdidas por material inquemado disminuyen de 52,9% ($R_{total} = 0,68$) a 26,8% ($R_{total} = 2,37$). Las pérdidas por combustión incompleta presentan un máximo de 2,31% para un R_{total} de 1,29. A pesar que las menores conversiones de C-CO se encuentran tanto para R_{total} de 2,37 como R_{total} de 0,68, es claro que para este último se debe al déficit de aire lo cual se ve reflejado en la mayor pérdida por material inquemado.

Rojas y Castellanos (2010) reportan para combustión de BC en cámaras WARD-Cimpa las pérdidas mínimas por formación de CO se encuentran a un $R = 1,57$. La cantidad de inquemados es máxima para $R = 1,55$. En el presente estudio se considero un rango más amplio de excesos de aire y se encontró que los valores mínimos en pérdidas por formación de CO e inquemados se presentan a una relación de exceso de 2,37.

3.3. Etapa 3: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.

En la Figura 19 se presenta el diagrama de Pareto para los efectos de las variables FAP y FAS sobre la tasa de combustión de BC.

Figura 9. Diagrama de Pareto para la tasa de combustión de BC.



Fuente: Autores

Se observa que la principal variación de la tasa de combustión es debida al FAP. Se observa también que el FAS tiene una influencia nula sobre esta variable. Esta conclusión se ratifica con el análisis ANOVA (ver Tabla 4) aplicando la prueba estadística F a un nivel de confianza de 95%.

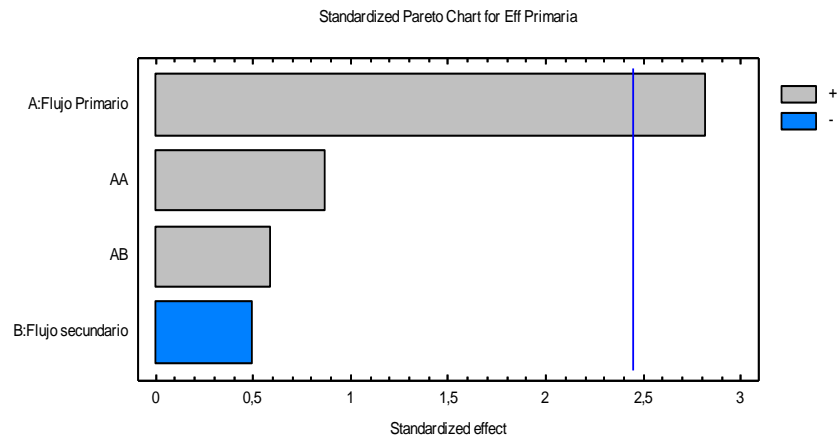
Tabla 4. Análisis de varianza para tasa de combustión.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Flujo Primario	$0,1512 \times 10^{-2}$	1	$0,1512 \times 10^{-2}$	6,90	0,0392
B:Flujo Secundario	$0,5633 \times 10^{-4}$	1	$0,5633 \times 10^{-4}$	0,26	0,6302
AA	$0,4760 \times 10^{-2}$	1	$0,4760 \times 10^{-2}$	21,72	0,0035
AB	$0,1104 \times 10^{-2}$	1	$0,1104 \times 10^{-2}$	5,04	0,0659
blocks	$0,3333 \times 10^{-4}$	1	$0,3333 \times 10^{-4}$	0,15	0,7100
Total error	$0,1314 \times 10^{-2}$	6	$0,2191 \times 10^{-3}$		
Total (corr.)	$0,8781 \times 10^{-2}$	11			

El FAP en su parte lineal y cuadrática tiene un valor de P inferior a 0.05, lo que indica que esta variable tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la tasa de combustión.

En la Figura 10 se presenta el diagrama de Pareto para los efectos de las variables FAP y FAS sobre la eficiencia primaria de combustión de BC.

Figura 10. Diagrama de Pareto para eficiencia primaria de combustión de BC



Fuente: Autores

El diagrama de Pareto muestra que la variable más influyente sobre la eficiencia primaria es el FAP, lo cual se corrobora con el ANOVA presentado en tabla 5.

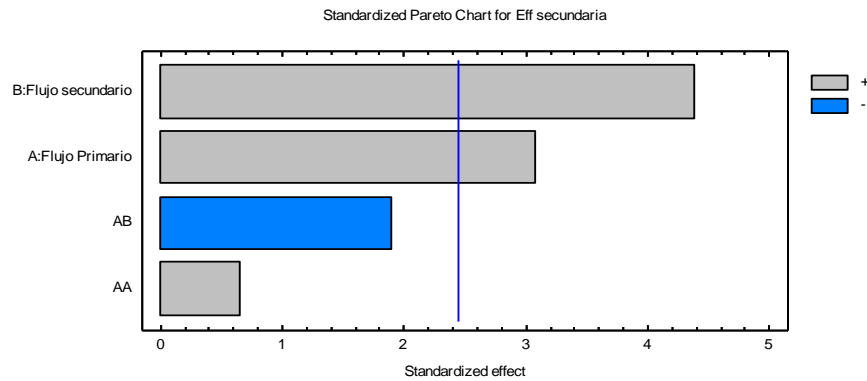
Tabla 5. Análisis de varianza para eficiencia primaria de combustión.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Flujo Primario	743,051	1	743,051	7,97	0,0302
B:Flujo secundario	23,1852	1	23,1852	0,25	0,6357
AA	70,2468	1	70,2468	0,75	0,4187
AB	32,4013	1	32,4013	0,35	0,5770
blocks	14,7852	1	14,7852	0,16	0,7042
Total error	559,192	6	93,1987		
Total (corr.)	1442,86	11			

El ANOVA en este caso indica claramente que la variabilidad en la eficiencia es debida al FAP con un nivel de confianza de 95%. El análisis estadístico confirma los resultados observados para la eficiencia primaria en la sección 3.2.2.

En la Figura 11 se presenta el diagrama de Pareto para los efectos de las variables FAP y FAS sobre la eficiencia secundaria de combustión de BC.

Figura 11. Diagrama de Pareto para eficiencia secundaria de combustión de BC



El diagrama de Pareto demuestra que tanto el FAP como el FAS influyen en la eficiencia secundaria, y que la variable más influyente sobre la eficiencia secundaria es el FAS, lo cual se corrobora con el ANOVA presentado en tabla 6.

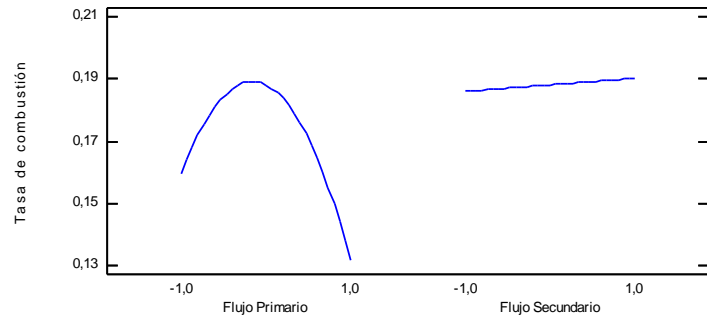
Tabla 6. Análisis de varianza para eficiencia secundaria de combustión.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
A:Flujo Primario	352,451	1	352,451	9,46	0,0218
B:Flujo secundario	717,653	1	717,653	19,26	0,0046
AA	15,8438	1	15,8438	0,43	0,5385
AB	133,661	1	133,661	3,59	0,1070
blocks	16,3333	1	16,3333	0,44	0,5325
Total error	223,517	6	37,2528		
Total (corr.)	1459,46	11			

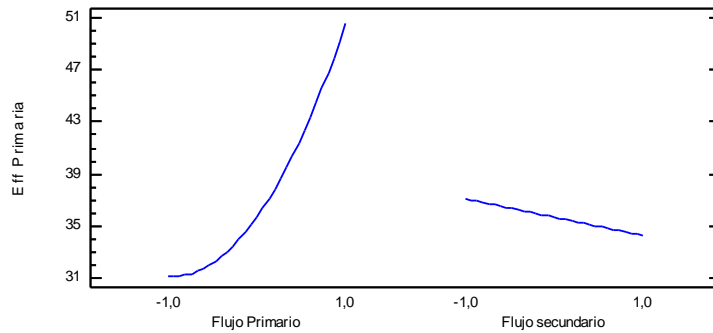
El ANOVA muestra que el FAP y el FAS tienen efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia secundaria de combustión con un nivel de confianza del 95%. El análisis estadístico confirma los resultados observados para

la eficiencia secundaria en la sección 3.2.2. La figura 12 muestra los efectos principales sobre las variables de estudio.

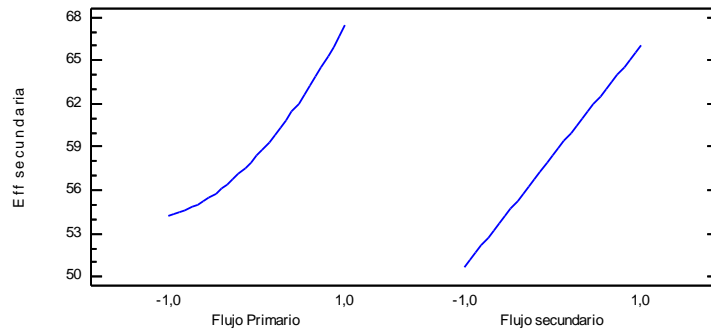
Figura 12. a. Efectos principales sobre la tasa de combustión. b. Efectos principales sobre la eficiencia primaria. c. Efectos principales sobre la eficiencia secundaria.



a.



b.



c.

Fuente: Autores

Las mayores tasas de combustión se presentan cuando el FAP se encuentra en su nivel medio ($0,53 \text{ kg/m}^2\text{s}$) y el FAS en su nivel alto ($0,84 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Para el caso de la eficiencia se obtienen los mejores valores para FAP alto ($0,75 \text{ kg/m}^2\text{s}$) y FAS alto ($0,84 \text{ /m}^2\text{s}$). Basados en la eficiencia de combustión se consideran estos últimos valores como las mejores condiciones de operación para el horno.

4. CONCLUSIONES

- En la combustión de bagazo de caña, en un horno de lecho fijo, los flujos de aire primario y secundario influyen significativamente en la eficiencia del proceso. Así mismo la disponibilidad de oxígeno permite llevar a cabo simultáneamente las etapas de oxidación de volátiles y combustión de carbonizado.
- La eficiencia de combustión del bagazo de caña en la cámara primaria no se ve afectada por el flujo de aire secundario, debido a que este flujo no tiene contacto con el lecho ni con los gases de combustión en la cámara primaria. Además, la eficiencia de combustión del bagazo de caña en la cámara secundaria aumenta con flujos de aires secundario debido a que la combustión de los volátiles ocurre casi en su totalidad con este flujo.
- Para flujos de aire superiores a los estequiométricos la tasa de combustión cae por el enfriamiento convectivo del aire. Las condiciones de operación para obtener las tasas de combustión más alta no es la misma con la que se presenta la eficiencia más alta; el hecho que el bagazo de caña se queme más rápido no quiere decir que la combustión sea más eficiente.
- Se recomienda operar las cámaras de combustión para bagazo de caña con flujos de aire primario de $0,75 \text{ kg/m}^2\text{s}$ y flujos de aire secundario de $0,84 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

5. BIBLIOGRAFÍA

CASTELLS X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Fundación Universitaria Iberoamericana. España, 2005.

GARCÍA H, Albarracín L. *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Barbosa, 2007.

GARCÍA H, Gordillo G. *Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Barbosa, 1992.

GONZALES K. *Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos en hornillas paneleras Ward-Cimpa en la hoya del río Suárez*. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

HUGOT E. *Manual para ingenieros azucareros*, Cia. Editorial continental, S.A. 2002.

KHOR A, Ryu C, Yang Y, Sharifi V, Suithenbank J. *Straw Combustion in a Fixed Bed Combustor*. Fuel 86 p. 152-160, 2007.

LIANG X, Ruiz. *Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed*. Bioresource Technology 99 p. 7238-7246. 2008.

LOO S, Koppejan J. *The Handbook of biomass combustion and Co-Firing*. Earthscan, 2008.

MILLER B, Tillman D. *Combustion engineering issues for solid fuel sistem.*A P, 2007.

NIESSEN W. *Combustion and Incineration prosses.* Marcel Dekker, 2002.

PORTEIRO J, Patiño D, Collazo J. *Experimental analysis of theignitionfrontpropagation of severalbiomassfuels in a fixed-bedcombustor.* ELSEVIER. Fuel 89 p. 26–35, 2010.

Red Institucional de Tecnologías. *Fuentes principales de contaminación. Limpias.* <http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311802/311802_fucon.htm>.

[Citado el 19 de marzo de 2012].

RODRÍGUEZ B. *La Agroindustria rural de la pana en Colombia roles: problemática Y nuevos retos.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Barbosa, 2004.

ROJAS H, Castellanos M. *Validación y ajuste de los modelos matemáticos de combustión generados por la UIS Y Corpoica para cámaras de hornillas paneleras tipo Ward-Cimpa.* Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

RYU C, Yang Y, Khor A, Yates N, Sharifi V, Swithenbank J. *Effect of fuel properties on biomass combustion.Part I. Experiments - fuel type, equivalence ratio and particle size.*Fuel 85 p. 1039–1046, 2006.

SAASTAMOINEM J, Richard J. Simultaneous drying and pyrolysis of soild fuel particles, *Combustion and Flame*, 106 p. 288-300, 1996.

SOLER J, Gonzales F. *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward – CIMPA en Hornillas Paneleras*. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2004.

THUNMAN H. *Principles and models of solid fuel combustion*. PhD Thesis, Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Goteborg. Sweden, 2001.

VAN DER LANS R, Pedersen L, Jensen A, Glarborg P, Dam-Johansen K. *Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace*. PERGAMON. Biomass and Bioenergy 19 p. 199-208, 2000.

DIAZ R. *Caracterización energética del bagazo de caña*. PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA. 2008.

YANG Y, Ryu C, Khor A, Yates N, Sharifi V, Swithenbank J. *Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach - identification of the controlling factors*. Fuel 84 p. 2116–2130, 2005.

ZHOU H, Jensen D. *Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed*. ELSEVIER. Fuel 84 p. 389–403, 2005.

ANEXOS

ANEXO A. Materiales y equipos utilizados.

Cantidad	Materiales y Equipos
1	Analizador de gases Testo 350-XL
1	Manometro de veleta Testo 400
11	Termocuplas tipo K para gases
1	Datalogger de 16 entradas
1	Balanza electrónica HCB 200K (200kg de capacidad)
1	Horno estufa Memmert, modelo 30, 220V, temperatura maxima 200°C
1	Mufla Carbolite EML(temperatura máxima 1100 °C)
1	Balanza analítica Mettler, modelo AE240, 110-220V, (240g de capacidad)
1	Balanza analítica referencia Precisa XB 2200c, (2200 g de capacidad)
1	Picadora Farm King FK 51001
2	Ventiladores Centrífugos con regulador de voltaje
1	Tamiz 4
1	Tamiz 2

1	Fluxómetro de 20 m
---	--------------------

Elementos de seguridad utilizados: overol, tapa oídos, tapabocas y guantes de cuero.

ANEXO B. Descripción e las pruebas.

Las pruebas fueron realizadas en el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA) ubicado en el municipio de Barbosa (Santander). Se construyó un horno piloto con las características descritas en la metodología (sección 3.1.1).



El bagazo utilizado se obtenía de trapiches de la zona y se almacenaba en las bagaceras del CIMPA. El bagazo alcanzaba una humedad de equilibrio de 11%. El bagazo de caña fue picado en la Picadora Farm King FK 51001 y tamizado para

obtener la distribución de tamaño de partícula deseado. Se utilizó malla número 2 para retirar las partículas muy grandes y malla número 4 para retirar el polvo.



Se pesó 1.7 kg de carga para cada prueba. La carga fue alimentada al horno y se midió la altura del lecho. Los flujos de aire correspondientes a cada prueba fueron ajustados utilizando un anemómetro de veleta.



Se ubicaron las termocuplas y se dio inicio a la prueba. El analizador de gases tomó mediciones cada 5 segundos y el Datalogger tomó medidas para cada termocupla cada 10 segundos. Se finalizaron las pruebas cuando todas las termocuplas alcanzaron una temperatura inferior a 60 °C.



Se recupero y peso la ceniza. Se midieron los inquemados con una prueba de carbonizado de la ceniza recuperada.

