

**DIAGNÓSTICO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA HORNILLA PILOTO
“WARD – CIMPA” UTILIZADA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA
EN CORPOICA**

**ODACYR BELEÑO MIER
YULY ANDREA VELOSA ARIZA**

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

2011

**DIAGNÓSTICO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA HORNILLA PILOTO
“WARD – CIMPA” UTILIZADA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
PANELA EN CORPOICA**

**ODACYR BELEÑO MIER
YULY ANDREA VELOSA ARIZA**

Trabajo de Grado presentado como requisito
Para optar al título de Ingeniero Químico

Directores:

**HUMBERTO ESCALANTE HIGUERA
Dr. Ingeniero Químico
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ZAMIR SANCHEZ CASTRO
Ingeniero Químico
CORPOICA**

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

2011

DEDICATORIA

A **DIOS** por dar le sentido a mi vida, por ser mi salvador, por escuchar mis suplicas día a día y por darme la oportunidad de obtener conocimiento en mi alma mater,
UIS.

A mis padres **Luis y Yaneth**, por sus consejos, por su comprensión, por su amor incondicional, por el apoyo que me han brindado en todas las etapas de mi vida.

A mi hermanita **Lorena**, por ser el motor de mi vida.

A mis hermanos **Jhon y Fabio**, por ser grandes seres humanos, por creer en mí y por brindarme su apoyo y amor.

A **Juan Marcelo S.** por su apoyo incondicional durante mi formación profesional, sin el este triunfo no hubiese sido posible.

A mi tío **José L. Velosa** por ser un luchador y por ser un ejemplo de vida.

A mi familia,

y. v. a

DEDICATORIA

A **Dios** por darme la fortaleza para lograr esta meta.

A mis Padres, **Alejandro Beleño O. y Gleydis Mier de Beleño.**

A mis Hermanos: **Germán Beleño, Vladimir Beleño, Aníbal A. Beleño.**

Porque siempre creyeron en mí, aun cuando todo parecía adverso.

Para ustedes con mucho cariño.

A mi familia

O.B.M

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander por formarnos como profesionales íntegros y con gran calidad Humana.

Al Doctor Humberto Escalante, por dirigirnos durante la ejecución de este trabajo de grado.

Al Ingeniero Zamir Sánchez, por la colaboración y apoyo.

A CORPOICA, por la financiación y acompañamiento.

A todo el personal del CIMPA, en especial Don Eugenio Kopps y Doña Alicia de Kopps, Javier Jiménez Vargas, Don Jorge, Don Miguel y Don Antonio, gracias por su colaboración, sin ustedes no se hubiese podido obtener este triunfo.

Al CEIAM, a la Doctora Yajaira y a la ingeniera Ligia Patricia, por la colaboración brindada durante todo este tiempo.

A todos nuestros amigos, que creyeron y animaron en momentos difíciles del proyecto: Eder Cano Navarro, Cesar Guevara Lastre, Leidy Trespacios, Andrés de La Rosa, Luis Alberto Chacón, Katlheen Guerra y muchos más, que aunque no están aquí inscritos fueron una voz de aliento para nuestras vidas.

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA.	19
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	22
2.1. EVALUACIÓN TEÓRICA DEL CALOR PRODUCIDO POR EL BC EN LA HORNILLA	22
2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BAGAZO DE CAÑA.	22
2.1.2. FORMULA QUÍMICA EMPÍRICA DEL BC.	22
2.1.3. FLUJOS DE MASA Y ENERGÍA EN LA CWC.	23
2.2. DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RAMPA DE PRESECADO EN LA HORNILLA WARD-CIMPA.	28
2.3. EFICIENCIA DE LA HORNILLA WARD-CIMPA.	30
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BAGAZO DE CAÑA	31
3.2 EVALUACIÓN TEÓRICA DEL CALOR OBTENIDO POR LA COMBUSTIÓN DE BC	32
3.2.1. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN EL CWC.	32
3.3 DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RAMPA DE PRESECADO EN LA HORNILLA WARD-CIMPA.	35
3.3.1. FRENTE DE FLAMA PARA BC CON HUMEDADES DE 52 – 57%.	35
3.3.2. FRENTE DE FLAMA PARA BC CON HUMEDADES DEL 32%.	38
3.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA HORNILLA WARD-CIMPA	39
4. CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	42

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de Corrientes del Proceso.	23
Tabla 2. Calor de formación del BC	26
Tabla 3. Composición elemental de diferentes combustibles.	31
Tabla 4. Condiciones de operación para combustión de BC.	32
Tabla 5. Balances de masa en la hornilla.	33
Tabla 6. Eficiencias energéticas de la CWC y la hornilla.	39

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Hornilla panelera	19
Figura 2. Ubicación de equipos en la cámara de combustión.	29
Figura 3. Comportamiento de las concentraciones de CO, CO ₂ (a) y del material inquemado (b) en función de la humedad del BC.	33
Figura 4. Perfil de temperatura en la ignición de BC en la superficie del lecho.	36
Figura 5. Perfil de temperatura para BC en el fondo del lecho.	37
Figura 6. Perfil de temperatura en el interior del lecho.	37
Figura 7. Perfil de temperatura en el interior del lecho.	38

RESUMEN

TÍTULO: DIAGNÓSTICO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA HORNILLA PILOTO “WARD – CIMPA” UTILIZADA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA EN CORPOICA*

AUTORES: Yuly Andrea Velosa Ariza; Odacyr Beleño Mier.**

PALABRAS CLAVES: Combustión, Cámara de combustión, Bagazo de caña, Gases de combustión, Temperatura de los gases de salida.

DESCRIPCIÓN:

La industria panelera es un sector de la economía nacional que hace presencia en gran parte del territorio Colombiano, y se perfila como uno de los sectores agroindustriales fuertes de la nación, por tal motivo procura por medio de la investigación la forma de encontrar el camino para mejorar su rentabilidad y productividad, realizando mejoras en sus diseños y procesos.

El conocer cómo será el desempeño energético de una hornilla panelera comercial, bajo ciertos parámetros de operación, es de suma importancia. Aunque por años de labor y de experiencia se han establecido condiciones de operación que permiten alto grado de productividad, no se ha hecho una recopilación de datos analíticos y experimentales, que nos lleven a conocer que está pasando en el interior de la hornilla.

En este trabajo se expone un diagnóstico del desempeño energético de una hornilla piloto Ward-cimpa ubicada en el Centro de Investigaciones para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera, con la finalidad de brindar nuevos conocimientos sobre la hornilla y su respuesta los parámetros de operación establecidos. Esto fue realizado mediante la medición de flujos de aire, flujos de masa de alimentación, composición de gases de combustión, perfiles de temperatura en cámara, ducto y chimenea, obteniendo como resultados indicadores que permiten evaluar la eficiencia y el comportamiento del equipo.

También se exponen los perfiles de temperatura en el interior de la cámara, indicando las diferentes formas de quemado del lecho y la influencia de la humedad en la velocidad de ignición del bagazo y en el proceso de combustión.

* Trabajo de grado

** Facultad de Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Humberto Escalante Higuera

ABSTRACT

TITLE: IDENTIFICATION OF THERMAL PERFORMANCE OF PILOT BURNER "WARD - CIMPA" USED IN THE PROCESS OF PRODUCTION OF PANEL ON CORPOICA`

AUTHORS: YULY ANDREA VELOSA ARIZA; ODACYR MIER BELEÑO ."

KEY WORDS: COMBUSTION, COMBUSTION CHAMBER, SUGARCANE BAGASSE, COMBUSTION GASES, TEMPERATURE OF FLUE GAS.

DESCRIPTION:

THE SUGARCANE INDUSTRY IS A PART OF THE NATIONAL ECONOMY AND TAKES A GREAT PART OF THE COLOMBIAN TERRITORY, AND IT IS KNOWN AS ONE OF THE STRONG "AGROINDUSTRIA" OF THE NATION, BECAUSE OF THIS MOTIVE IT LOOKS FOR A WAY THROUGH INVESTIGATION TO MAKE MORE PRODUCTS BY MAKING BETTER DESIGNS AND PROCESS.

TO KNOW HOW IS THE ENERGETIC PERFORMANCE OF A COMMERCIAL BURNER SUGARCANE. IT'S VERY IMPORTANT ACCORDING TO THE OPERATION PARAMETERS, BECAUSE IT'S NECESSARY TO ESTABLISH SOME OPERATING CONDITIONS FOR A BETTER PRODUCTIVITY AND IN THIS WAY TO KNOW WHAT HAPPEN INSIDE THE BURNER.

THIS WORK PRESENTS A DIAGNOSTIC OF THE ENERGETIC BURNERS PERFORMANCE "WARD-CIMPA" SITUED IN THE RESEARCH CENTER FOR THE IMPROVEMENT OF THE PANELA AGRO-INDUSTRY WITH THE PURPOSE TO GIVE NEW KNOWLEDGES ABOUT THE BURNER AND HOW TO APPLY THE OPERATING OF ESTABLISHED PARAMETERS. THIS WAS DONE BY MEASUREMENT AIR FLOW, MASS FLOW SUPPLY, FLUID GAS COMPOSITION, TEMPERATURES PROFILE INSIDE A CAMERA, DUCT AND FIREPLACE, IN THIS WAY TO OBTAIN AS RESULT THE INDICATORS THAT ALLOW TO EVALUATE THE EFFICIENCY AND THE PERFORMANCE EQUIPMENT.

IT ALSO PRESENT THE TEMPERATURE PROFILES INSIDE THE CAMERA, SHOWING THE DIFFERENT WAYS TO BURN THE SUGAR CANE JUICE AND THE INFLUENCE OF WATER AND THE WAY OF IGNITION RUBBISH AND THE COMBUSTION PROCESS.

* Work degree

** Faculty of Physical Chemistry, School of Chemical Engineering, Director Humberto Higuera Escalante

GLOSARIO

HORNILLA PANELERA: Es un horno usado en el proceso de elaboración de panela, en este se transforma la energía del bagazo en energía calorífica, para evaporar el agua contenida en los jugos extraídos de la caña.

BAGAZO DE CAÑA: Residuo orgánico resultante del proceso de molienda de la caña y es utilizado como combustible en la hornilla panelera.

COMBUSTIÓN: Es el proceso por el cual el combustible reacciona con el comburente para liberar su energía interna.

CÁMARA DE COMBUSTIÓN: Es el espacio dentro del cual ocurre la mezcla de combustible y aire, para generar gases de combustión los cuales son reutilizados.

GASES DE COMBUSTIÓN: Son productos obtenidos del proceso de combustión, estos productos gaseosos pasan a través del ducto, transfiriendo calor sensible a las pailas y concentrando los jugos obtenidos del proceso de extracción.

FLUJO DE ALIMENTACIÓN: Cantidad de biomasa que se le suministra a la cámara de combustión por unidad de tiempo.

PERIODO DE ALIMENTACIÓN: Tiempo transcurrido donde se inicia nuevamente el proceso de combustión.

CEIAM: Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales.

CIMPA: Centro de Investigaciones para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera.

INTRODUCCIÓN

La economía Colombiana tiene como un reglón principal de producción al sector agroindustrial, debido a su riqueza en climas y terrenos fértiles para su aprovechamiento. En ese reglón de la economía perteneciente a la agroindustria sobre sale la industria panelera, debido principalmente a la extensión de terreno dedicado al cultivo de caña para su producción. Según datos de Fedepanela, para el año 2010 las hectáreas cultivadas de caña panelera en Colombia ascendieron a 240.428 [8], contribuyendo al 4,2% de la producción agrícola, sin contar con el café, y representando el 1,9% de la actividad agropecuaria [21]. En el año 2007 la producción de panela representó el 7,3% del PIB agrícola nacional [18]. Para este mismo año la región de la Hoya del Río Suárez (que comprende los departamentos de Santander y Boyacá) contribuyó con el 32% de la producción total [2].

Las locaciones donde se lleva a cabo la generación de energía y transferencia de calor a los jugos son llamadas hornillas Paneleras. La industria panelera procura autosatisfacer el requerimiento energético de sus hornillas utilizando el bagazo de la caña residuo del proceso de producción. Se estima que la producción anual de bagazo de caña seco, en trapiches Colombianos, asciende a 2'345.715 t/año [10], los cuales son utilizados en la generación de energía térmica en las cámaras de combustión, para el proceso de elaboración de panela. Teniendo en cuenta un poder calorífico neto para el bagazo de 17.765 kJ/kg [13], se puede calcular que la energía disponible para la producción de panela en el país asciende a 66.295,8 TJ/año. De esta energía tan solo se aprovecha alrededor de un 33%, el restante 67% se distribuye en pérdidas por combustión incompleta, pérdidas por conducción y radiación por paredes y pérdidas por calor emitido por chimenea. Cabe resaltar que estas pérdidas se han disminuido gracias a las mejoras en el diseño hechas por Corpoica a las hornillas.

La corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), por medio de su Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA), ha dedicado cerca de 20 años en estudios para su mejoramiento térmico. A pesar de estos años de investigación, los mejoramientos son realizados en una forma empírica, sin un conocimiento detallado de la forma en que ocurre la combustión de bagazo dentro de las cámaras, ni la forma en que se transfiere calor en los intercambiadores. Para el caso específico de la cámara Ward-Cimpa, el desconocimiento del comportamiento de la combustión del bagazo, ocasiona condiciones de operación inadecuadas, dando como resultado capacidades de producción bajas, por debajo de las de diseño, y consumos de combustibles adicionales elevados.

Trabajos anteriores han tratado de establecer condiciones de operación adecuadas para obtener un mayor aprovechamiento energético del combustible, pero utilizando sistemas de tiro forzado y tamaños de partícula y humedades menores a los realmente utilizados en hornillas comerciales [23]. Otros trabajos han estudiado el desempeño de hornillas comerciales, pero sus balances de masa ignoran el material inquemado y sus balances de energía no tienen cuenta el calor de formación del combustible [1, 11], lo que ocasiona que se reporten eficiencias superiores a las reales.

El CIMPA evaluó la eficiencia de combustión de las cámaras Ward-Cimpa y Cimpa-Plana; utilizando el desempeño de la hornilla bajo operación con tiro inducido por ventilador y la combustión de bagazos con humedades no superiores al 45% [23]. Posteriormente, utilizando 12 hornillas paneleras comerciales, se desarrollo un diagnostico energético y la evaluación del calor perdido por paredes y por gases de chimenea [1]. Mediante un estudio realizado a cinco hornillas paneleras comerciales, de la Hoya del Rio Suarez, Corpoica pudo establecer que una posición de 60° en la válvula de alimentación del aire y realizando el

suministro cada 150 s, se obtenía un incremento en la eficiencia de combustión para bagazos muy húmedos [11].

A nivel mundial los estudios de la combustión de la biomasa, en hornos a escala de laboratorio, se han centrado en determinar la influencia que tiene sobre el proceso las variables velocidad de frente de flama, el tipo de biomasa, el tamaño de partícula y las relaciones aire primario a secundario [4, 3, 15, 16, 17].

El presente trabajo tiene como objetivo principal obtener información del desempeño energético real de una hornilla con cámara de combustión Ward-Cimpa, bajo condiciones de operación normales en un trapiche comercial. El estudio se realizó partiendo de una medición detallada de los flujos de aire, las temperaturas, humedades del combustible, flujos de alimentación y composiciones de gases, con la finalidad de obtener indicadores del desempeño energético del equipo. Para cumplir con los objetivos se realizaron pruebas en una hornilla Ward-Cimpa ubicada en las instalaciones del CIMPA en Barbosa (Santander); dado que esta hornilla es un prototipo de las construidas en la zona, su comportamiento se puede considerar representativo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA.

La molienda de las cañas se realiza en molinos mecánicos de tres o cuatro mazas, alcanzando porcentajes de extracción de 60% en peso. El jugo de los molinos se conduce hacia un pre limpiador, el cual tiene un diseño especial para que las impurezas gruesas, tales como bagazo y tierra, se separen por diferencia de densidades (Figura 1).

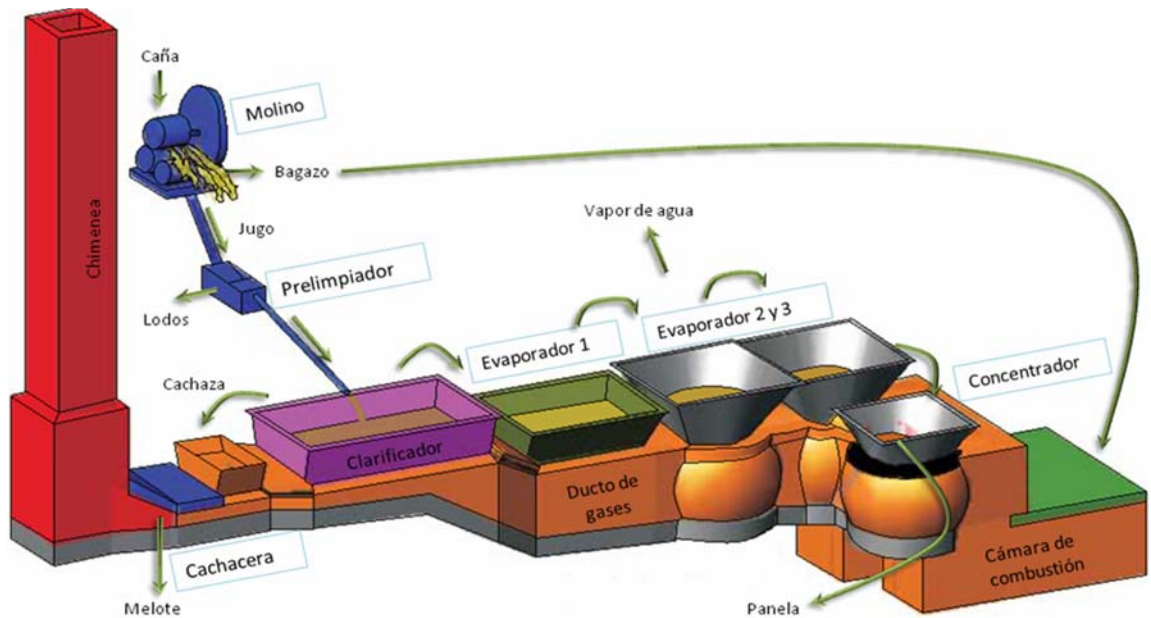


Figura 1. Hornilla panelera

*Fuente: Corpoica

Del pre limpiador los jugos son transportados por tubería hacia la paila clarificadora, la cual está ubicada sobre el horno. En la etapa de clarificación se calienta el jugo hasta su punto de ebullición y se adiciona un aglutinante natural, como cadillo o balso, para eliminar las impurezas disueltas. El jugo clarificado se

descarga, a la etapa de evaporación, constituida de una o más pailas y se concentran hasta 60 °B, punto en el cual cambian su nombre al de mieles. Mediante un cucharón, las mieles se transportan a la paila concentradora para alcanzar el punto de panela de a 94 °B. Finalmente el producto concentrado es batido, empacado y transportado a los centros de distribución.

Las hornillas paneleras presentan tres secciones principales: i) Cámara de Combustión, ii) Tren o ductos de transferencia y iii) Chimenea (Figura 1).

En la cámara de combustión se incinera el bagazo, para la generación de la energía necesaria para el proceso. Tradicionalmente las hornillas son de geometría rectangular y con volúmenes de reacción muy pequeños. Corpoica ha implementado la Cámara Ward-Cimpa (CWC) la cual tiene un volumen de reacción tres veces mayor, con respecto a la hornilla tradicional. La CWC posee una rampa de presecado, para utilizar bagazos con humedades cercanas al 50%. Las CWC trabajan con excesos de aire superiores al 60%, utilizan áreas libres de parrilla del 60% y para su diseño se utilizan factores de parrilla y de volumen de 1000 kW/m² y 300 kW/m³, respectivamente [9].

Por el ducto (Figura 1) circulan los gases de combustión y entregan la energía a las pailas ubicadas sobre el (intercambiadores de calor). El ducto es de sección transversal rectangular. La concentración de los jugos en las pailas ocurre en evaporación abierta. Con el fin aumentar el área y mejorar la transferencia de calor hacía los jugos, Corpoica ha introducido nuevos tipos de pailas: planas con aletas, pirotubulares y acanaladas [9]. Finalmente a través de la chimenea se expulsan los gases y mediante una válvula se genera el tiro necesario para garantizar el suministro de aire a la cámara de combustión [9].

1.2. BAGAZO DE CAÑA (BC)

El Bagazo de Caña (BC) se utiliza como combustible en las cámaras de combustión. El BC sale del proceso de extracción con humedades cercanas al 50% y debe secarse en cobertizos llamados bagaceras [23]. El BC es un material fibroso lignocelulósico y está constituido por tres fracciones principales; celulosa 25-40%, hemicelulosa 25-50% y lignina 10-30% [25].

El BC es considerado como una fuente de biomasa natural y está compuesto por C, H, O, N, ξ (cenizas). El carbono presente en el BC es la principal especie química de combustible su oxidación es considerada fundamental para la generación de calor [4]; mientras que el nitrógeno es un inerte y solamente reacciona a altas temperaturas [25]. El porcentaje de cenizas, en la combustión de BC, depende del contenido de humedad, el tipo de suelo de cultivo y el corte mecanizado de la caña [6,17]. El hidrogeno que posee el BC se piroliza y se convierte en hidrocarburo e hidrogeno molecular, posteriormente estas moléculas reaccionan con el oxigeno en exceso convirtiéndose completamente en vapor de H₂O [12].

El Poder Calórico (PC) es una propiedad físico-química importante de los combustibles biomásicos. El PC de una biomasa es función de su composición elemental y su contenido de humedad y de cenizas [13]. El poder calórico se puede expresar como Poder Calórico Superior (PCS) o Poder Calórico Inferior (PCI). El PCS tiene en cuenta toda la energía desprendida por el combustible seco, cuando sus gases de combustión son enfriados a 25 °C. Sin embargo debido a la elevada humedad del BC es más conveniente utilizar en los cálculos el PCI; el cual considera que el agua de reacción y la contenida en el combustible salen en fase de vapor [23].

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este trabajo se llevo a cabo mediante las etapas: a) Evaluación teórica del calor obtenido por la hornilla, b) Descripción del desempeño de la rampa de presecado en la CWC y c) Determinación de la eficiencia de la CWC.

2.1. EVALUACIÓN TEÓRICA DEL CALOR PRODUCIDO POR EL BC EN LA HORNILLA

2.1.1. Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña.

La composición elemental del BC depende de la variedad de caña y las condiciones de cultivo, para el presente trabajo se utilizó una composición promedio de: 47% Carbono, 44% Oxígeno, 6,5% Hidrógeno y 2,5% cenizas [13]. El PCS para el bagazo se tomó como 19.260 kJ/kg [13], a partir de este valor se calculó el cálculo del PCI; restando la energía necesaria para la evaporación del agua.

2.1.2. Formula química empírica del BC.

La formula química empírica del BC se determinó con base a 1 kg de bagazo seco, utilizando la composición elemental promedio reportada por *Hugott et. Al.* [13] y el procedimiento reportado por *Colomba Di Blasi et. Al.* [4]. Por lo anterior, se obtuvo una relación de la forma: $CH_{1,662}O_{0,7033}$.

2.1.3. Flujos de masa y energía en la CWC.

Para obtener los flujos de masa y energía, se desarrollaron pruebas en la hornilla piloto ubicada en las instalaciones del Cimpa en Barbosa (Santander). Esta hornilla de 50 kg/h de capacidad, cuenta con una cámara de combustión Ward-Cimpa con área de parrilla de 0,26 m² y 60% de área libre, volumen de cámara de 0,86 m³ y se operó con la válvula mariposa a 90 ° (totalmente abierta).

Los balances de masa y energía se desarrollaron tomando dos volúmenes de control diferentes: el primero en la cámara de combustión y el segundo en la hornilla total; incluyendo el tren de intercambiadores. Para determinar el flujo de las corrientes que ingresaron y salieron de la hornilla, se establecieron los balances por componentes y la ecuación de fracción total.

Los balances de masa se realizaron a partir de las siguientes suposiciones:

- Todo el hidrogeno del bagazo reacciona para formar H₂O.
- El aire atmosférico solo está constituido por N₂ (79%) y O₂ (21%) [5].
- No hay pérdidas de masa en ninguna sección de la hornilla.
- La generación de NO_x es despreciable.

En la tabla 1 se presenta el nombre y la descripción de cada corriente utilizada en los balances.

Tabla 1. Descripción de Corrientes del Proceso.

Nombre de la corriente	Descripción
B	Flujo másico de bagazo (kg/h)
A	Flujo molar de aire (kmol/h)
G	Flujo molar de gases de combustión (kmol/h)
I	Flujo molar de Carbono inquemado (kmol/h)
C	Flujo másico de cenizas (kg/h)

*Fuente: Autores

Balance por componente de Carbono.

$$\frac{0.47B}{PM_C} = Gy_{CO} + Gy_{CO_2} + I \quad (1)$$

Balance por componente de Hidrógeno.

$$\frac{0.065B}{PM_H} = 2 * (H_2O)_{formada}$$

(2)

Balance por componente de Nitrógeno.

$$0.79A = Gy_{N_2} \quad (3)$$

Balance por componente de Oxígeno.

$$\frac{0.44B}{PM_O} + 2(0.21A) = 2Gy_{CO_2} + Gy_{CO} + 2Gy_{O_2} + (H_2O)_{formada} \quad (4)$$

Fracción Molar.

$$1 = y_{CO_2} + y_{CO} + y_{N_2} + y_{O_2} \quad (5)$$

Donde:

y_i = fracción molar del componente i.

El flujo de bagazo (B) se estableció según las condiciones de operación de la hornilla. Fue medido con la ayuda de una balanza electrónica de 50 kg de capacidad. El flujo de aire que ingresó a la cámara (A), cuya fracción molar se tomo como 0,21 de Oxígeno y 0,79 de Nitrógeno [5], fue medido con un anemómetro de Hilo Caliente marca Testo 435 y posteriormente transformado a flujo molar. La composición de la corriente de gases (G), se estableció con la ayuda de un analizador de gases marca Testo 350 XL y una sonda de muestreo estándar de 700 mm de longitud. Las moles de carbono sin reaccionar (I) se obtuvieron de la solución de los balances.

El balance de energía para la cámara de combustión se presenta en la ecuación número 6.

$$Q_b + Q_a + Q_{rx} = Q_g + Q_{pc} + Q_{\xi} + Q_{SI} \quad (6)$$

Donde:

Q_b = Calor ingresado al sistema por el bagazo (kJ/h).

Q_a = Calor ingresado al sistema por el aire (kJ/h).

Q_{rx} = Calor de combustión (kJ/h).

Q_g = Calor retirado del sistema por los gases de combustión (kJ/h)

Q_{pp} = Calor sensible perdido por paredes (kJ/h)

Q_{si} = Calor sensible perdido en inquemados (kJ/h)

Q_{ξ} = Calor sensible perdido en Cenizas (kJ/h)

Reemplazando a la ecuación (3) en términos de capacidades caloríficas:

$$B \int_{T^0}^{T_{25^{\circ}}} C_{p_b} dT + A \int_{T^0}^{T_{25^{\circ}}} C_{p_a} dT + Q_{rx} = \\ G \int_{T^0}^{T_{Comb}} C_{p_g} dT + Q_{pp} + \xi \int_{T^0}^{T_{Comb}} C_{p_{\xi}} dT + I \int_{T^0}^{T_{Comb}} C_{p_c} dT$$

(7)

Donde

C_{p_b} = Capacidad Calorífica del bagazo (kJ/kg K)

C_{p_a} = Capacidad calorífica del aire (kJ/kg K)

C_{p_g} = Capacidad calorífica de los gases de combustión (kJ/kg K)

C_{p_c} = Capacidad calorífica de Carbono (kJ/kg K)

$C_{p_{\xi}}$ = Capacidad calorífica de la Cenizas (kJ/kg K)

T^0 = Temperatura de referencia para los cálculos (K).

$T_{25^{\circ}}$ = Temperatura ambiente (K)

T_{comb} = Temperatura de combustión alcanzada (K)

Tomando como temperatura de referencia para los cálculos 25°C (la temperatura ambiente), se pudo considerar que $Q_b = Q_a = 0$. El calor de combustión se calculó con la ayuda de la siguiente ecuación [22].

$$Q_{rx} = \sum_{\text{Productos}} n_i (\Delta H_{298}^o) - \sum_{\text{Reactivos}} n_i (\Delta H_{298}^o) \quad (8)$$

Donde

n_i = moles del compuesto i (Kmol).

ΔH_{298}^o = Calor de formación del compuesto i a 298 K (kJ/Kmol)

El calor de formación del bagazo de caña, se calculó teniendo en cuenta que su fórmula química y entalpia de formación pueden ser hallados por la suma y resta de reacciones aplicando la ley de Hess; según el procedimiento descrito por *Zainal et. Al.* [28].

Tabla 2. Calor de formación del BC

Reacción	Calor de Formación [kJ/kmol]
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-393.509
$0,831 H_2 + 0,4155 O_2 \rightarrow 0,831 H_2O$	-200.950,758
$CO_2 + 0,831 H_2O \rightarrow C H_{1,662} O_{0,7033} + 1,06385O_2$	480.232,666
$C + 0,35165O_2 + 0,831 H_2 \rightarrow C H_{1,662} O_{0,7033}$	-114.227,092

*Fuente: Autores

El calor perdido por paredes se determinó por diferencia, despejándolo de la ecuación (6)

$$Q_{pp} = Q_{rx} - Q_g - Q_{\xi} - Q_{SI} \quad (9)$$

El balance de energía en la hornilla completa (tomando en cuenta el calor transferido a pailas), se puede representar en la ecuación.

$$Q_b + Q_a + Q_{rx} = Q_j + Q_{ph} + Q_{\xi} + Q_{SI} + Q_{ch} \quad (10)$$

Donde los términos nuevos Q_j y Q_{ch} son:

Q_j = Calor aprovechado en el calentamiento y evaporación de los jugos (kJ/h).

Q_{ch} = Calor arrojado en los gases de chimenea (kJ/h)

Q_{pp} = Calor perdido por paredes (kJ/h)

El calor arrojado en los gases de chimenea se calculó con la expresión:

$$Q_{ch} = m_g \int_{T^o}^{T_{chimenea}} C_{p_g} dT \quad (11)$$

Donde

T_{Ch} = Temperatura medida en la chimenea (K)

El calor aprovechado en los jugos se determinó, con la ecuación:

$$Q_j = m_j C_{p_j} + m_{Evap} \lambda_{Evap} \quad (12)$$

Donde

m_j = Flujo másico de jugos (kg/h)

C_{p_j} = Capacidad Calorífica de los jugos (kJ/kg K)

ΔT = Cambio de temperatura en los jugos (K).

m_{evap} = Flujo de agua evaporada de los jugos (kg/h)

λ_{evap} = Entalpía de evaporación del agua (kJ/kg)

Para el cálculo de la capacidad calorífica del jugo, se utilizó la formula empírica reportada por García *et. al.* [9].

$$C_{p_j} = 4,18(1 - 0.006^\circ B_j) \quad (13)$$

Donde:

$^\circ B_j$ = Concentración de azúcar en el jugo, en grados Brix.

Por último, la cantidad de agua evaporada se calculó con un balance de azúcar en el jugo y el producto terminado, teniendo en cuenta una concentración de azúcares en la panela de 94 $^\circ B$ [9].

$$m_{Evap} = m_j \left(1 - \frac{^{\circ}B_j}{^{\circ}B_p} \right) \quad (14)$$

Donde:

m_j = Flujo másico de jugo procesado (kg/h).

$^{\circ}B_p$ = Concentración de azúcar en la panela: 94 $^{\circ}$ B.

Las temperaturas necesarias para solucionar los balances de energía, se obtuvieron con la ayuda de termocuplas tipo K, ubicadas en el horno, en el ducto de gases y en la chimenea. Para la determinación de la temperatura de los jugos se utilizaron sondas de inmersión Pt 100.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RAMPA DE PRESECADO EN LA HORNILLA WARD-CIMPA.

El efecto de la rampa de presecado se determinó mediante la velocidad del frente de flama, debido a que esta es función del contenido de humedad del combustible. Para la velocidad del frente de flama se desarrolló el perfil de temperatura del lecho de combustible, instalando 5 termocuplas tipo K en diferentes Puntos de Toma de Muestras (PTD) en el interior del lecho, con 3 cm de distancia entre ellas y una termocupla tipo K encima del lecho (ver figura 1). Para estas pruebas se utilizaron bagazos con humedades promedio del 57% y del 32%.

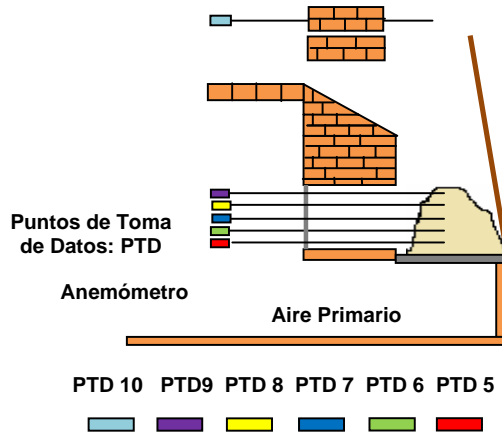


Figura 2. Ubicación de equipos en la cámara de combustión.

*Fuente: Autores.

Para el cálculo de la velocidad del frente de flama se tomó una temperatura de referencia para la combustión, la cual fue establecida con los valores promedios obtenidos en las corridas experimentales. El tiempo que tardó el primer PTD a el ultimo PTD dentro del lecho en alcanzar la temperatura de referencia, junto con la distancia entre estas (PTD), permitió calcular la velocidad del frente flama; según el procedimiento utilizado por *Zhou et. Al.* [12].

$$V_{flama} = \frac{\Delta Z}{t} \quad (15)$$

V_{flama} = Velocidad del frente de flama (m/s).

ΔZ = Distancia entre PTD 9 y PTD 5 (m)

t = tiempo que tarda el frente en moverse de PTD 9 a PTD 5 (s)

2.3. EFICIENCIA DE LA HORNILLA WARD-CIMPA.

Se determinaron 6 indicadores para evaluar la eficiencia energética del equipo:

I_1 : Eficiencia energética de la cámara de combustión

I_2 : Eficiencia energética de la hornilla.

I_3 : Pérdidas por paredes

I_4 : Perdidas por gases de chimenea.

I_5 : Perdidas por inquemados.

I_6 : Pérdidas por combustión incompleta.

Donde cada uno fue calculado de la siguiente manera:

$$I_1 = \frac{Q_g}{m_b * PCI} \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{Q_j}{m_b * PCI} \quad (17)$$

$$I_3 = \frac{Q_{ph}}{m_b * PCI} \quad (18)$$

$$I_4 = \frac{Q_{ch}}{m_b * PCI} \quad (19)$$

$$I_5 = \frac{Q_l}{m_b * PCI} \quad (20)$$

$$I_6 = \frac{Q_{CO}}{m_b * PCI} \quad (21)$$

Q_l y Q_{CO} son el calor perdido por la no reacción del carbono inquemado y el calor perdido por combustión incompleta, respectivamente.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BAGAZO DE CAÑA

Tabla 3. Composición elemental de diferentes combustibles.

Elemento Químico	% Fracción Másica					
	Bagazo[13]	Madera [29]	Lignito [29]	Carbón Bituminoso [17]	Paja [20]	Paja de arroz [26]
C	47	50	64,0	73,39	44	42,02
H	6,5	6,0	4,2	4,31	5,9	6,26
O	44	43	19,2	0,73	40	39
S	-----	----	1,3	0,78	0,14	0,64
N	-----	1	0,9	0,58	0,67	1,23
ξ	2,5	0,5	10,4	----	9,3	10,83

A excepción de la madera, el BC posee mayores contenidos de carbono y menores contenidos de cenizas que otras biomásas (ver tabla 3). Un mayor contenido de carbono significa un mayor poder calorífico. Por su parte, las cenizas ocasionan obstrucción del aire a través la parrilla durante la combustión de la biomasa en lecho fijo; restándoles cualidades como combustible. A pesar que el contenido de carbono del BC es menor al de un carbón mineral, también lo es su contenido de azufre, disminuyendo el impacto ambiental durante su combustión.

Por las anteriores razones el BC se puede considerar como la segunda biomasa, después de la madera, con mayores cualidades como fuente de energía renovable.

3.2 EVALUACIÓN TEÓRICA DEL CALOR OBTENIDO POR LA COMBUSTIÓN DE BC

Para cada uno de los flujos de BC (con un determinado valor de humedad) el funcionamiento de la hornilla estuvo condicionado a un valor específico de porcentaje de exceso de aire (Tabla 4).

Tabla 4. Condiciones de operación para combustión de BC.

Prueba	Flujo de BC (kg/h)	Humedad de BC (%)	Exceso de aire (%)	PCI (kJ/kg)
P1	48	57	126	16.553
P2	53	52	41	16.668
P3	96	32	64	17.114

*Fuente: Autores

Los consumos de combustible para humedades cercanas al 50% (P2) son similares a los encontrados por Soler y Gómez [23]. Las pruebas P1 y P3 muestran que un aumento en la humedad (cerca del 60%) ocasiona una reducción en la tasa de consumo de BC de aproximadamente un 10%.

3.2.1. Balance de masa y energía en el CWC.

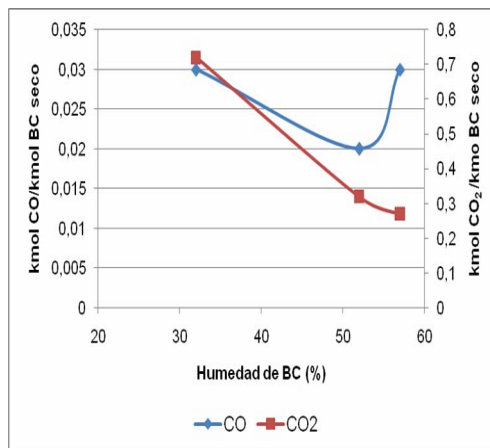
Las concentraciones obtenidas de CO₂ y CO en chimenea son muy inferiores a los reportados por otros estudios, en los cuales se trabajó con BC con humedad muy similar al experimento P3 [11, 22, 23]. Si se compara el material inquemado reportado por Rojas y Castellanos (0,00083 Kmol/Kmol BC seco) [22] con el obtenido en este trabajo, se puede deducir que la diferencia en las concentraciones de CO₂ y el CO se debe a una reacción incompleta de las partículas de BC.

Tabla 5. Balances de masa en la hornilla.

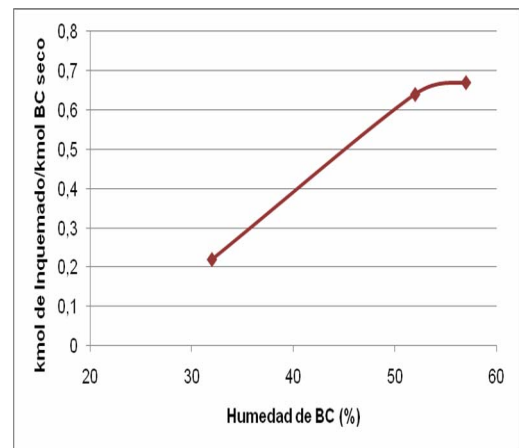
Corriente	Unidades	P1	P2	P3
Flujo de BC seco (B)	[kmol /h]	0,83	1,02	2,62
Flujo de aire seco (A)	[kmol /h]	9,49	7,30	21,69
Flujo de gases secos(G)	[kmol /h]	9,45	7,25	21,57
Flujo de cenizas (C)	[kg/h]	0,52	0,64	1,63
Inquemados (I)	[kmol /h]	0,56	0,65	0,57
	[kmol/kmol BC seco]*	0,67	0,64	0,22
(CO ₂) _G	[kmol/kmol BC seco]*	0,27	0,32	0,72
(CO) _G	[kmol/kmol BC seco]	0,03	0,02	0,03
(O ₂) _G	[kmol/kmol BC seco]*	2,05	1,10	0,93
(N ₂) _G	[Kmol/kmol BC seco]*	9,03	5,66	6,54

*Forma de expresar la concentración por Soler y Gómez [31].

*Fuente: Autores



(a)



(b)

Figura 3. Comportamiento de las concentraciones de CO, CO₂ (a) y del material inquemado (b) en función de la humedad del BC.

El contenido de humedad del BC durante el proceso de combustión afecta directamente las concentraciones de CO, CO₂ y de material inquemado (Figura 3). Inicialmente las concentraciones de CO y CO₂ disminuyeron con el contenido de humedad, a expensas de un aumento en la cantidad del material inquemado. Un posterior aumento de la humedad ocasionó disminución de la concentración de CO₂, a expensas de un aumento de la concentración de CO, mientras el material inquemado permaneció casi constante.

Tabla 6. Balances de energía en la hornilla.

Flujo de Calor	Ecuación modelo de cálculo	Unidades	P1		P2		P3	
			Valor	%*	Valor	%*	Valor	%*
Calor de Reacción (Q _{rx})	[8]	[kJ/h]	163.860		236.735		985.374	
Calor a la salida de la CWC (Q _g)	[7]	[kJ/h]	101.632	62	136.166	58	714.531	72
Calor sensible en material inquemado (Q _{si})	[7]	[kJ/h]	2006	1	1542	0,7	1253	0,1
Calor sensible en cenizas (Q _c)	[7]	[kJ/h]	113	0,06	219	0,09	1064	0,1
Perdida por paredes de CWC (Q _{pc})	[9]	[kJ/h]	60.109	37	98.808	42	268.525	27
Calor aprovechado por jugos (Q _j)	[12]	[kJ/h]	0**	0	44.258	19	275.622	28
Calor perdido en chimenea(Q _{ch})	[11]	[kJ/h]	59.935	37	66.137	28	320.504	32
Pérdida por paredes de la hornilla (Q _{ph})	[10]	[kJ/h]	101.805	62	124.578	53	386.929	39

*Porcentaje con respecto al calor de reacción.

**Esta prueba se realizó sin pailas en la hornilla.

*Fuente: Autores

Los valores de calor de reacción para P1, P2 y P3 incrementaron respectivamente; esto se debe a que el contenido de humedad fue decreciendo en los respectivos BC. Por consiguiente el incremento en el calor de reacción generado por el BC, en las pruebas, ocasionó una mayor oferta de calor de la CWC.

El calor sensible perdido en el material inquemado es una función directa del contenido de humedad del BC, dado que durante la combustión su generación aumenta con el contenido de agua de la biomasa. En cada una de las pruebas el contenido de cenizas producido durante la combustión estuvo directamente relacionado con el contenido de humedad del BC. Por consiguiente el calor retirado por las cenizas fue bajo y inversamente proporcional al agua presente en el combustible.

El calor transferido por paredes, tanto en la CWC como en la hornilla, disminuyó significativamente con la utilización de bagazos del 32% de humedad. El calor aprovechado en el calentamiento y evaporación de los jugos fue mayor en P3, debido a que el calor entregado por la CWC al tren de intercambiadores aumentó y en consecuencia también lo hizo la producción de panela. La pérdida de calor en los gases de chimenea se mantuvo casi constante, con un promedio del 32% del calor de reacción.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RAMPA DE PRESECADO EN LA HORNILLA WARD-CIMPA.

3.3.1. Frente de flama para BC con humedades de 52 – 57%.

En el lecho de BC se pudo observar diferentes comportamientos del frente de flama dependiendo de la humedad del combustible. Para humedades del 52 al 57% el lecho de BC presentó tres perfiles diferentes del frente de flama: i)

iniciando en la superficie del lecho, ii) iniciando en la parte inferior del lecho y iii) ignición simultánea en superficie y fondo.

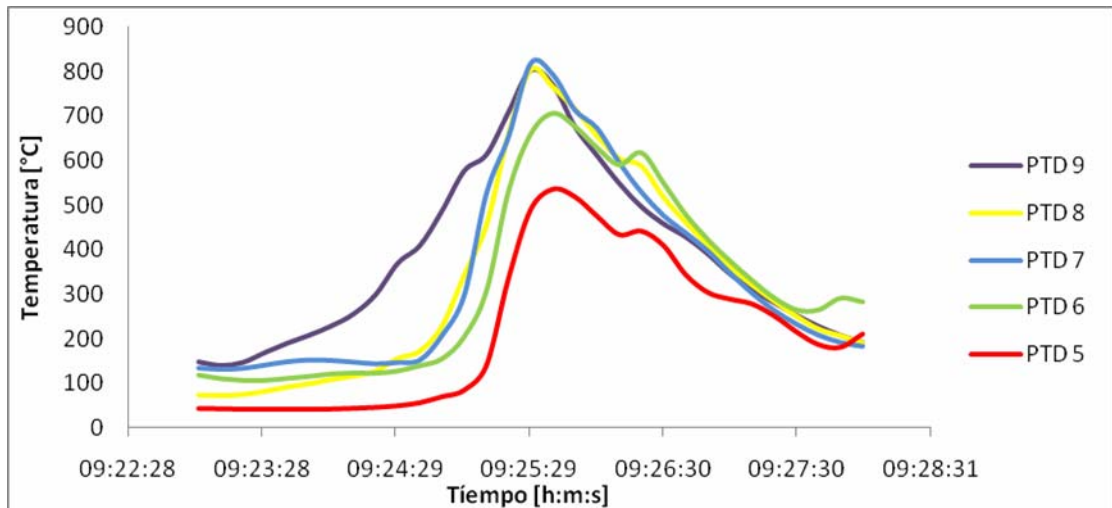


Figura 4. Perfil de temperatura en la ignición de BC en la superficie del lecho.

La expansión de calor generado por la combustión de volátiles calienta la superficie del lecho, disminuyendo la humedad hasta alcanzar su temperatura de ignición [24]. En la figura 4 se observa que el frente de flama inicia en la parte superior del lecho (PTD 9). Después que el frente de ignición se presenta la llama pasa por cada PTD, hasta llegar a la zona inferior, en la cual se presenta el menor valor de temperatura en PTD 5. Estos resultados concuerdan con otros estudios, de tal forma que se comprueba que un frente de llama único baja por el lecho y produce la combustión capa por capa, disminuyendo la altura del lecho por la pérdida de masa [24]. Este comportamiento se presentó debido a que la permanencia en la rampa de presecado permitió una disminución considerable de su humedad.

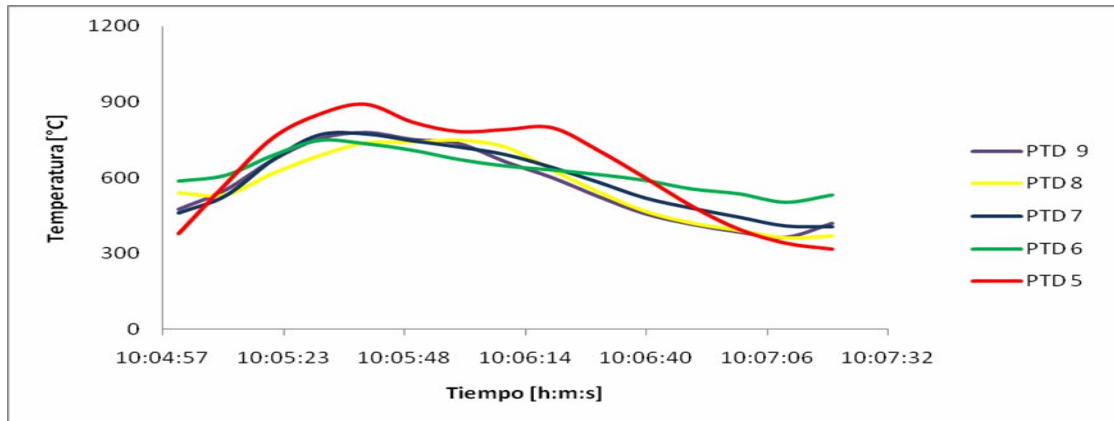


Figura 5. Perfil de temperatura para BC en el fondo del lecho.

En la figura 5 se observa que la ignición del frente de flama inicia desde la parte inferior del lecho (PTD 5), donde registra la máxima temperatura. El oxígeno que ingresa en el aire primario reacciona con el material carbonizado acumulado sobre la parrilla, liberando suficiente calor para calentar las capas adyacentes del alimento hasta la temperatura de ignición [4, 26]. De esta manera, el frente de flama asciende por el lecho hasta la superficie. Este frente de flama se presentó, debido a que la rampa de presecado no garantizó una reducción de humedad suficiente para la ignición en la superficie

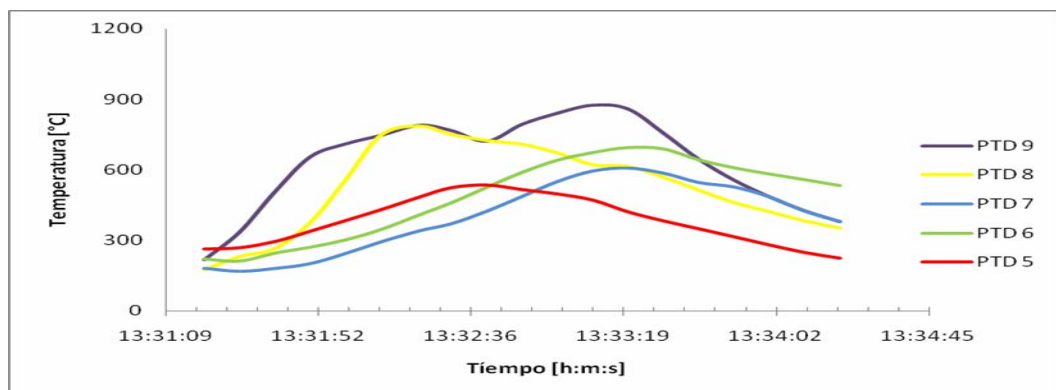


Figura 6. Perfil de temperatura en el interior del lecho.

Cuando el lecho de BC no es consumido totalmente y se ingresa alimento fresco, se presentan dos frentes de ignición. En la figura 6 se pueden identificar estos dos frentes con el incremento de las temperaturas en PTD 9 y PTD 5, simultáneamente. Este comportamiento se presentó, debido a la ignición por radiación en la superficie y la oxidación del carbonizado sobre la parrilla.

En conclusión para las humedades del 52%-57% se evaluó (de acuerdo a la ecuación 15) la velocidad promedio del frente de flama en 0,00086 m/s, con un tiempo de ignición del lecho de 2,3 min y una temperatura promedio registrada en el frente de 433 °C.

3.3.2. Frente de flama para BC con humedades del 32%.

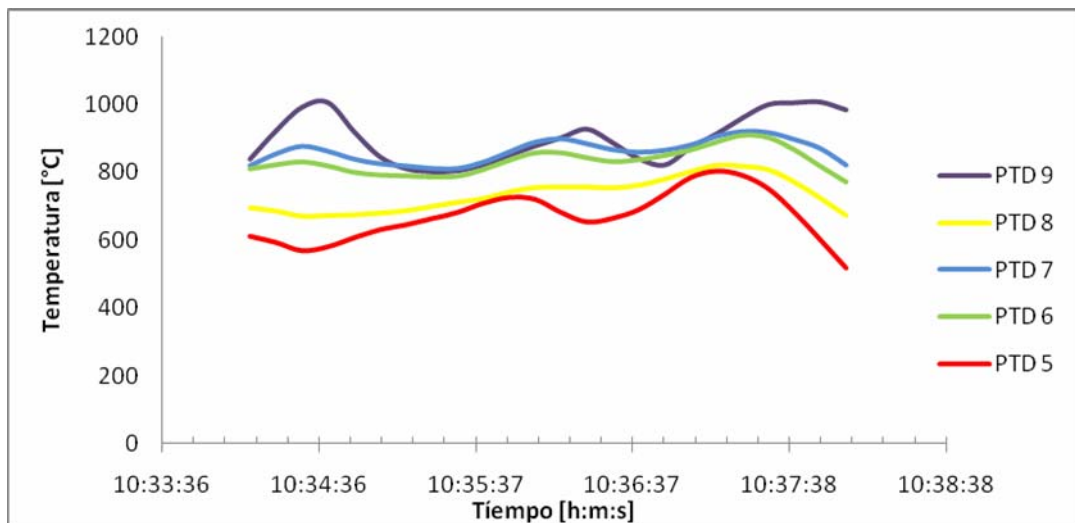


Figura 7. Perfil de temperatura en el interior del lecho.

En la figura 7 se puede observar que la combustión de BC con humedad del 32%, presenta un perfil de temperatura estable, indicando que los procesos endotérmicos de evaporación, no son predominantes [27]. Este perfil es

consecuencia de un buen desempeño de la rampa de presecado, garantizando que el combustible se encuentre seco cuando ingresa al lecho.

Para esta prueba de combustión del BC con humedad del 32% no se pudo determinar la velocidad de frente de flama debido a que el proceso de ignición fue muy rápido y barrió el lecho en pocos segundos. Durante esta prueba el lecho alcanzó las mayores temperaturas, mejorando notablemente el tiro de la chimenea y el suministro de aire, lo cual garantizó un flujo de alimentación continuo.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA HORNILLA WARD-CIMPA

Tabla 6. Eficiencias energéticas de la CWC y la hornilla.

Indicador	Ecuación modelo de cálculo	P1	P2	P3
Eficiencia energética de la CWC (I_1)	[16]	0,30	0,32	0,64
Eficiencia energética de la hornilla (I_2)	[17]	---	0,10	0,25
Pérdida por paredes (I_3)	[18]	0,30	0,25	0,34
Pérdida por gases de chimenea (I_4)	[19]	0,17	0,15	0,29
Pérdida por inquemados (I_5)	[20]	0,49	0,43	0,05
Pérdidas por combustión incompleta (I_6)	[21]	0,04	0,02	0,02

*Fuente: Autores

La eficiencia de la cámara presento un comportamiento similar al reportado en otros trabajos [23,11]. La eficiencia energética de la CWC disminuyó con el contenido de humedad del BC, debido principalmente al decrecimiento del calor de reacción. La eficiencia energética de la hornilla fue superior cuando se trabajó BC

del 32% de humedad; como consecuencia del aumento en el calor aprovechado por los jugos (Q_j).

Mientras en Indicador del calor perdido por paredes se mantuvo casi constante (promedio de 0,3); el calor perdido por chimenea presentó un comportamiento proporcional al calor de reacción. Tendencias semejantes, tanto para I_3 como para I_4 , fueron reportados por Gonzales [11] en su trabajo sobre hornillas comerciales. Debido a que la generación de material inquemado aumentó con el contenido de humedad del BC, también lo hizo la cantidad de energía perdida por su no combustión. Las pérdidas por combustión incompleta fueron el doble para P1, comparadas con P2 y P3, debido al aumento de la concentración de CO en los gases de chimenea (Figura 3).

4. CONCLUSIONES

El desempeño de las hornillas Ward-Cimpa utilizadas en la industria panelera en la Hoya del Rio Suarez demostró que está directamente relacionado con el contenido de humedad del Bagazo de caña, y por ende con la cantidad de material inquemado generado en el proceso. Por lo anterior, en este estudio se demostró el efecto de los inquemados en el proceso de combustión de bagazo de caña húmedo. Para bagazo de caña con un rango de humedades entre 32% y 56%, el material inquemado generado durante la combustión aumentó sensiblemente con el contenido de agua, ocasionando una disminución en el calor liberado de la reacción.

Las perdidas por material inquemado no son despreciables como se ha reportado en trabajos anteriores, para obtener la eficiencia real de las Hornillas Ward Cimpa es necesario incluirlos dentro del balance de masa y de energía.

La velocidad del frente de flama permite evaluar el desempeño de la rampa de pre secado indicando si las etapas de evaporación predominan en la combustión del BC.

Los indicadores establecidos muestran que las modificaciones realizadas al diseño de la hornilla Ward Cimpa aun permiten pérdidas significativas en chimenea y paredes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARREDOND V, H. I. (2004). Diagnostico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia. Facultad Nacional de Agronomía , vol 57 (No 2), 15 p
- [2] BOUCHER, F. e. (1995). AGROINDUSTRIA RURAL RECURSOS TECNICOS Y ALIMENTICIOS. (C. d. Rica, Ed.) San Jose de Costa Rica: ISBN 92-9039-274 5.
- [3] C H A R L E S D, S. a. (2002). Analysis of Combustion of Graphite-Uranium Fuels in a Fixed Bed or Moving Bed. American Chemical Society. , 223-233.
- [4] COLOMBA, D. b. (1999). Countercurrent fixed-bed Gasification of Biomass at Laboratory Scale. American Chemical Society , vol 38, 2571-2581 pág.
- [5] COULSON J, M. e. (1984). Ingenieria Quimica Tomo III. Barcelona España: Reverte.(composicion del aire)
- [6] Díaz, R. (Septiembre 8 al 12 de 2008). Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA”. Riobamba - Ecuador.
- [7] FEDEPANELA. (14 de Enero de 2011). Areas y produccion proyectada año 2010. Obtenido de <http://www.fedepanela.org.co/images/ESTADISTICASPANELA2010.JPG>
- [8] GARCIA H, R. e. (2009). Tercer informe de seguimiento 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 regiones productoras de panela colombiana. Presentado al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corpoica: C.I. Tibaitatá.
- [9] GARCIA, H. e. (1992). Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa.

- [10] GARCIA, M. e. (s.f.). Hornilla panelera, Evaluación de su impacto ambiental. Revista Innovación y cambio tecnológico , vol 4.
- [11] GONZALEZ A, K. (2010). Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos, en hornillas paneleras Ward-Cimpa en la hoya del rio suarez. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- [12] H. ZHOU, A. a. (2004). Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. Sciende Direct , 15 pág
- [13] HUGOTT, E. (s.f.). Manual para ingenieros azucareros.
- [14] JENKINS B.M et al. (1998). Combustion properties of biomass, Elseiver, Vol 54, pag 17-46.
- [15] KENNETH, B. (1996). Numerical Modeling of a Deep, Fixed Bed Combustor. Energy & Fuels , vol 10, 269-275 pág.
- [16] LIGANG, L. e. (2008). Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. Bioresource Technology , vol 99, 7238-7246 pág.
- [17] MERENCIO, D. e. (s.f.). Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado. CETER, CIEMAT .
- [18] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio Agrocadenas colombia. (Marzo de 2005). La cadena agroindustrial de la panela en colombia. Obtenido de http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2005112163343_caracterizacion_panela.pdf.
- [19] OCTAVE, L. e. (2005). Ingeniería de las reacciones Químicas. Barcelona España: Reverte.
- [20] OKASHA, F. (2007). Combustion of rice straw in fluidized bed. Experimental thermal and fluid sciencie , Vol 32, 52-59.
- [21] OSORIO C, G. (2007). Buenas prácticas agrícolas BPA y Buenas Prácticas de Manufactura BPM. CPT Print Medellin: ISBN 978-92-5-305910-2.
- [22] ROJAS, H. e. (2010). Validación y ajuste de los modelos matemáticos de combustión generados por la uis y Corpoica para cámaras de hornillas

paneleras tipo ward-cimpa. Bucaramanga: Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

[23] SOLER V, J. P. (2004). Determinación de los parámetros de operación y diseño de cámara de combustión tipo Ward-Cimpa y Plana-Cimpa en hornillas paneleras. Bucaramanga: Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

[24] TAO, L. e. (2008). Combustion Characteristics of Particles of Hazardous Solid Waste in a Fixed Bed. Journal of Hazarduos Materials .

[25] TILLMAN, D. A. (1991). The combustion of solid fuels and wastes. Academic Press .

[26] Van der Linss, R. L. (2000). Modelling and experiments of straw combustion in a grate. Biomass and Energy , Vol 19, 199-288.

[27] Winter, F. (1997). Temperatures in a fuel particle burning in a fluidized bed, the effect of drying, devolatilization and char combustion. Combustion and flame , vol 108, 302-314.

[28] Z.A Zainal, e. a. (2001). Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. Energy Conversion and Management. Energy Conversion and Management. , vol 42, 1499-1515.

[29] REED T.B et al. Handbook of biomass Downdraft gasifier Engine systems. Solar Technical information program. March 1988. pag 140