

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA
HUMEDAD DE COMBUSTIBLE SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA
COMBUSTIÓN DE BAGAZO DE CAÑA EN UN HORNO DE LECHO FIJO**

YULY CELENY CAMACHO ZAFRA

KAREL GIOVANNY NUÑEZ TAMAYO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICO-QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2012

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA HUMEDAD
DE COMBUSTIBLE SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE
BAGAZO DE CAÑA EN UN HORNO DE LECHO FIJO**

YULY CELENY CAMACHO ZAFRA

KAREL GIOVANNY NUÑEZ TAMAYO

**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 TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE BAGAZO DE CAÑA EN 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 mis papitos Hernando Camacho y Yely Zafra por estar a mi lado regalándome todo su amor y apoyo incondicional, por levantarme las veces que caí y creí no poder hacerlo sola, porque sin ellos este mi sueño no se habría hecho realidad.

Los amo con mi corazón y son mi razón de ser.

A mis hermanitos Dayan, Hernando, Elian y Juan José Camacho Zafra, por ser mis amigos, cómplices y confidentes siempre que los necesite. Espero ser su ejemplo a seguir.

Nunca olviden que los amo.

A mis amigas con quienes compartí momentos inolvidables y a quienes agradezco por brindarme un abrazo y una sonrisa siempre que lo necesite, en especial a, Nidia Reina Adriana Ramírez y Catherine Almendrales, es lindo contar con personas como uds las llevo en el corazón.

A todos uds muchas gracias por compartir este logro conmigo y sentir mi alegría como suya. Dios los Bendiga.

Yuly Celeny Camacho Zafra

DEDICATORIA

A Don Hernando quien con un costoso y doloroso sacrificio me enseñó hasta el último instante el valor de los valores, y mostró que su mayor obra fue ser un ejemplo de existencia y un aliento de fuerza para justipreciar nuestros lazos en esta tierra.

A Doña Carmen, quien con su bravío esfuerzo y tenaz amor a prueba de todo, convierte el diario vivir en un emblema de motivación y lucha por ella y en ella, mi motor para levantarme todas las mañanas.

A Claudia por mostrarme y darme la esperanza que durante el tiempo de oscuridad nacerá una luz que nos alumbrara por siempre.

A Sandra, Alba, Sonia, Heidi, Jefferson por compartir y trasegar el mismo camino que nuestros dos ángeles forjan y forjaron día a día, ayudándonos todos pareciendo uno. A Nicolás, Camilo, Daniel, Sara y Samuel quienes prolongarán nuestras huellas y Ana por mostrarnos cuales seguir.

A mis amigos por mostrarme que aunque seguir el camino es difícil es mucho más fácil hacerlo con los vagos, para Sandra Moreno, Gerardo Amado, Barbas Zanguña, Lorocue Celis, Vitor Velasco, Chepe, Luismi Gayon, , Doña Anacleto y Su familia; entre otros que por no nombrarlos no significa que no estén presentes en mis más gratos recuerdos.

Muchas Gracias

Karel Giovanny Nuñez Tamayo

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 aptas para competir en un mundo laboral con una formación impecable.

A **Humberto Escalante**, Ph.D., Director de proyecto de grado, por su orientación 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 Eugenio, Don Ferlein 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

INTRODUCCION.....	18
1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 Hornilla Panelera.....	20
1.1.1 Cámara de combustión Ward-CIMPA.....	21
1.2 Bagazo de caña.	21
1.3 Proceso de Combustión Materiales Sólidos en Lecho Fijo.	22
1.4 Fases de la Combustión en Lecho Fijo	23
1.4.1 Secado de Combustibles Sólidos.....	23
1.4.2 Devolatilización de combustibles sólidos.	23
1.4.3 Combustión del material carbonizado.....	24
1.5 Propagación del frente de Flama	24
2. DESARROLLO EXPERIENTAL	27
2.1 Etapa 1: Pruebas en el horno prototipo.	27
2.2 Etapa 2: Análisis del frente de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.	29
2.3 Etapa 3: Cálculo de las tasas de combustión, temperaturas máximas, eficiencias de combustión y potencia de salida del horno.....	30
2.4 Etapa 4: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.....	32
3. RESULTADOS Y ANALISIS	33
3.1 Etapa 2 Análisis del frente de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.	21
3.1.1 Identificación de las etapas.....	34
3.1.2 Velocidad del frente de flama. (VF)	36
3.2 Etapa 3: Cálculo de las tasas de combustión, temperaturas máximas, eficiencias de combustión y potencia de salida del horno.....	37
3.2.1 Tasa de Combustión (TC).....	37
3.2.2 Eficiencia de combustión (EC) y pérdidas en el sistema	38

3.2.3 Potencia Generada	39
3.3 Etapa 4: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.....	40
4. CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hornilla panelera.....	20
Figura 2. Propagación frentes de conversión e ignición en horno de lecho fijo.	255
Figura 3. Horno Prototipo.....	288
Figura 4. Diseño experimental.....	29
Figura 5. Temperaturas del lecho de bagazo como una función del tiempo (tamaño de partícula > 5 mm y humedad del 10% en peso).....	33
Figura 6. Diferentes etapas de combustión en el lecho de bagazo (tamaño de partícula > 5 mm y humedad del 10% en peso).....	34
Figura 7. Temperatura del lecho como función del tiempo y la humedad (termocúpla No. 4).....	35
Figura 8. Velocidad del frente de flama como una función de la humedad y el tamaño de partícula.....	37
Figura 9. Tasa de combustión como una función de la humedad y el tamaño de partícula.....	38
Figura 10. Eficiencia de combustión y pérdidas por distintos parámetros.	39
Figura 11. Potencia vs humedad.....	40
Figura 12. Análisis Diagrama de Pareto.....	41
Figura 13. Análisis Pareto.....	42
Figura 14. Influencia de humedad y tamaño en eficiencia y tasa de combustión.	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Balances de masa y energía en el horno.....	31
Tabla 2. Resultado análisis ANOVA.....	42
Tabla 3. Comparación análisis ANOVA.....	43

ABREVIATURAS

Notación	Característica
B	Flujo másico de bagazo (kg/s)
A	Flujo molar de Carbono inquemado (kmol/s)
G	Flujo molar de gases de combustión (kmol/s)
I	Flujo molar de aire (kmol/s)
C	Cantidad de Cenizas (kg/s)
y	fracción molar del componente i
Q_b	Calor ingresado al sistema por el bagazo (kJ/s).
Q_a	Calor ingresado al sistema por el aire (kJ/s).
Q_{rx}	Calor de combustión (kJ/s).
Q_g	Calor retirado del sistema por los gases de combustión (kJ/s)
Q_{pp}	Calor sensible perdido por paredes (kJ/s)
Q_{si}	Calor sensible perdido en inquemados (kJ/s)
Q_ξ	Calor sensible perdido en Cenizas (kJ/s)
C_{pb}	Capacidad Calorífica del bagazo (kJ/kg °C)
C_{pa}	Capacidad calorífica del aire (kJ/kg °C)
C_{pg}	Capacidad calorífica de los gases de combustión (kJ/kg °C)
C_{pc}	Capacidad calorífica de Carbono (kJ/kg °C)
C_{pξ}	Capacidad calorífica de la Cenizas (kJ/kg °C)
T^o	Temperatura de referencia para los cálculos (°C).
T_{25°}	Temperatura ambiente (°C)
T_{comb}	Temperatura de combustión alcanzada (°C)

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA HUMEDAD DE COMBUSTIBLE SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN DE BAGAZO DE CAÑA EN UN HORNO DE LECHO FIJO*

AUTORES: NUÑEZ TAMAYO, Karel Giovanni, y, CAMACHO ZAFRA, Yuly Celeny.**

PALABRAS CLAVES: Horno prototipo, cámara Ward Cimpa, combustión de bagazo, secado, devolatización, combustión de material sólido.

DESCRIPCIÓN: La producción de panela ha sido tradicionalmente uno de los principales sectores económicos de Colombia; representando una de las actividades más importantes de la economía campesina. En este proceso los jugos son concentrados, para posteriormente ser solidificados en una hornilla panelera que es el implemento del trapiche encargado de transformar la energía del bagazo de caña, obtenido durante la molienda, en la energía calórica necesaria para evaporar el agua contenida por los jugos.

Debido a la baja eficiencia de las hornillas paneleras el bagazo de caña no es suficiente para suplir las necesidades energéticas del proceso, ocasionando consumos adicionales de leña, caucho de llanta, carbón y aceite usado. Gran parte de la ineficiencia térmica de las hornillas se debe a una pobre combustión del bagazo de caña, ocasionando grandes concentraciones de CO y gases de chimenea.

Por el anterior motivo, este trabajo pretende estudiar por medio del análisis de las temperaturas alcanzadas en el horno, la composición de los gases, el tiempo total de quemado del lecho y el frente de flama, la influencia de las diferentes etapas sobre la combustión de bagazo en cámaras Ward-Cimpa; Lograr avances en este aspecto ayudará no sólo a tecnificar el proceso de producción de panela, sino también a aumentar su eficiencia térmica y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Ph.D. Co-director: Zamir Sanchez Ing. Q.

ABSTRACT

TITLE: “STUDY OF THE INFLUENCE OF PARTICLE SIZE AND FUELMOISTURE ON THE BEHAVIOR OF THE BAGASSE COMBUSTION IN A FIXED BED FURNACE”*

AUTHORS: NUÑEZ TAMAYO, Karel Giovanni, y, CAMACHO ZAFRA, Yuly Celeny.**

KEY WORDS: The sugarcane production has traditionally been one of the main economic sectors in Colombia, representing one of the most important activities of the rural economy. In this process the juice is concentrated and then are solidified in a sugarcane burner is the attachment of the mill in charge of transforming the energy from sugarcane bagasse, obtained during the grinding, the heat energy needed to evaporate the water contained by the juices.

Due to the low efficiency of the burners sugarcane bagasse is not sufficient to meet the energy needs of the process, causing additional fuel consumption, tire rubber, coal and oil. Much of the burner's thermal inefficiency is due to poor combustion of bagasse, causing high concentrations of CO and flue gases.

For the above reason, this paper aims to study through the analysis of the temperatures in the furnace, the gas composition, total burning time of the bed and the flame front, the influence of the different stages of combustion Ward-bagasse Cimpa cameras, making progress in this regard will not only help the process of introducing technology sugarcane production, but also to increase thermal efficiency and reduce negative impacts on the environment.

* Degree Project.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Ph.D. Co-director: Zamir Sanchez. Ing.Q.

INTRODUCCION

La producción de panela ha sido tradicionalmente uno de los principales sectores económicos de Colombia; representando una de las actividades más importantes de la economía campesina. A nivel mundial Colombia es considerado el segundo productor de panela, después de la India, con una producción estimada en 1.200.000 t/año y valorada en 550 millones de dólares. El sector panelero genera cerca de 470.000 empleos directos e indirectos, ocupa 226.000 hectáreas para el cultivo de caña y participa con el 6,7% del PIB agrícola del país [1].

Durante el proceso de producción de panela los jugos son concentrados hasta cerca de 94 °B, para posteriormente ser solidificados. La hornilla panelera es el implemento del trapiche encargado de transformar la energía del bagazo de caña, obtenido durante la molienda, en la energía calórica necesaria para evaporar el agua contenida por los jugos. Debido a la baja eficiencia de las hornillas paneleras (alrededor del 20 y 30 %) [11] el bagazo de caña no es suficiente para suplir las necesidades energéticas del proceso, ocasionando consumos adicionales de leña, caucho de llanta, carbón y aceite usado. Se calcula que el sector panelero consume en promedio 1.000.000 de t/año de leña, convirtiendo esta agroindustria en una de las mayores deforestadoras del país. Hay evidencias de que la quema de llantas en hornos paneleros produce emisiones de dioxinas, mercurio, hidrocarburos poliaromáticos (HPA) y metales pesados como plomo, zinc, níquel y vanadio.

Gran parte de la ineficiencia térmica de las hornillas se debe a una pobre combustión del bagazo de caña, ocasionando concentraciones de CO entre 10.000 y 30.000 ppm en los gases de chimenea [12,13]. Por este motivo la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) lleva cerca de 20 años investigando en el mejoramiento energético de los hornos paneleros, logrando avances significativos en el tema como lo es la introducción de la cámara

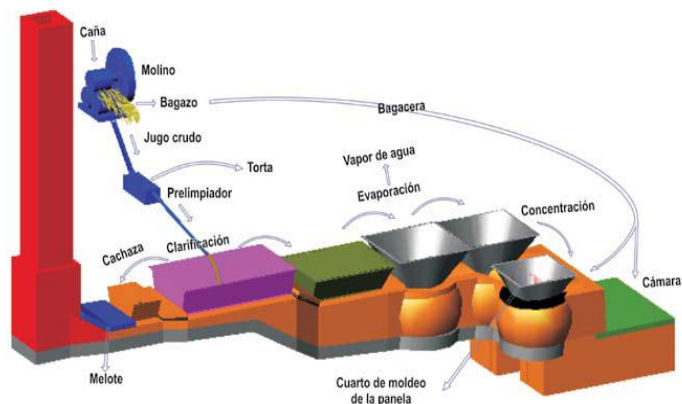
de combustión Ward-Cimpa. A pesar de estos años de investigación aún se desconoce la manera en que se presentan las reacciones de combustión del bagazo dentro de los hornos, razón por la cual no se cuenta con modelos matemáticos para sus diseños. Por tal motivo, este trabajo pretende estudiar por medio del análisis de las temperaturas alcanzadas en el horno, la composición de los gases, el tiempo total de quemado del lecho y el frente de flama, la influencia de las diferentes etapas sobre la combustión de bagazo en cámaras Ward-Cimpa. Lograr avances en este aspecto ayudará no sólo a tecnificar el proceso de producción de panela, sino también a aumentar su eficiencia térmica y reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Hornilla Panelera

La hornilla, es el implemento del trapiche encargado de transformar la energía del combustible (bagazo) en energía térmica; en esta se delimitan tres zonas, en las cuales se realiza una acción determinada: la cámara de combustión, el ducto de humos y la chimenea [31].

Figura 1. Hornilla panelera



Fuente: Guía tecnológica para el manejo integral productivo del sistema de caña panelera, 2007.

La cámara de combustión es el lugar donde alimenta el bagazo necesario para el proceso; tradicionalmente es construida en forma rectangular y se distinguen tres tipos: Cámaras planas tradicionales, cámara Plana-Cimpa y Cámaras Ward-Cimpa. Los gases calientes provenientes de la cámara de combustión, circulan a través del ducto donde ceden parte del calor sensible a las pailas. Al final del ducto se encuentra la chimenea por medio de la cual se expulsan los gases de combustión hacia la atmosfera. Estos gases circulan en la hornilla por tiro natural, debido a la diferencia de presión asociada con el movimiento de los gases a través

de la chimenea. El tiro generado depende principalmente de las dimensiones de la chimenea y la temperatura de los gases.

1.1.1 Cámara de combustión Ward-CIMPA.

Este tipo de cámara posee un diseño especial que aumenta la eficiencia de la combustión y del proceso, puesto que en ella se obtiene una mayor estabilidad en términos de temperatura y potencia con el tiempo. Un cámara de este tipo puede alcanzar temperaturas cercanas a los 1200 °C, con una producción promedio de CO de 3% en volumen y de CO₂ de 14% en volumen, cuando se le suministra un exceso de aire del 60% y una humedad promedio del bagazo del 40% [3].

Esta cámara posee dos características importantes con respecto a los otros tipos. En primer lugar, posee una rampa donde se precalienta el bagazo antes de quemarse, allí la humedad contenida en el bagazo se evapora por medio de la energía radiante proveniente de la masa de bagazo incandescente de la cámara; esta característica permite introducir incluso, bagazo recién salido del molino que por lo general contiene una humedad cercana al 55% en peso.[13] En segundo lugar, el aire requerido para la combustión se suministra en dos corrientes: una de aire primario que circula a través de la parrilla y que corresponde al 70% del volumen total de diseño, y otra de aire secundario correspondiente al 30% restante, que se suministra en la parte superior de la cámara Ward por medio de tubos cilíndricos [3].

1.2 Bagazo de caña.

El bagazo de caña es un material que tiene alto contenido fibroso y bajo contenido proteínico, en su estructura predominan los carbohidratos estructurales ricos en lignina. El bagazo de caña tiene una composición promedio en peso de 47% de

Carbono, 44% de Oxígeno, 6,5% de hidrógeno y 2,5 % de Cenizas, y un poder calorífico superior de 19.200 kJ/kg [12].

El Poder Calórico (PC) es una propiedad físico-química importante de los combustibles biomásicos; es función de su composición elemental y su contenido de humedad y de cenizas [32]. Este 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 bagazo de caña 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 [6].

En las economías de los países productores de caña de azúcar, el bagazo ocupa un papel importante como portador energético; un indicador de esta importancia es la relación con fuel-oil en lo que al valor energético se refiere, ya que 5 toneladas de bagazo, perfectamente adecuadas, pueden sustituir a una tonelada de petróleo. También en el orden medioambiental tiene gran importancia, en cuanto al incremento de la eficiencia de su aprovechamiento favorecería el empleo de las fuentes renovables de energía. Con su uso se disminuye el impacto de las emisiones de CO₂, se atenúan los efectos de la lluvia ácida y del efecto invernadero [16].

1.3 Proceso de Combustión Materiales Sólidos en Lecho Fijo.

El proceso de combustión inicia con la reacción de combustible sólido con el oxígeno presente en el aire circundante, produciendo principalmente: calor, CO₂, CO y H₂O. Durante el proceso de combustión, la masa de cada elemento involucrado no se altera, de modo que al escribir ecuaciones químicas y resolver problemas que comprendan las cantidades de varios componentes, el asunto se reduce básicamente a considerar la conservación de la masa de cada elemento.

Durante la combustión existe una cantidad mínima de aire denominado aire teórico, esta es capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para una combustión completa, es decir, cuando todo el carbono presente en el combustible reacciona a CO_2 , en la práctica solo se obtiene combustión completa cuando se añade al proceso una cantidad de aire superior a la teórica denominada exceso de aire, debido a la dificultad de mezclar el aire con el combustible en las diversas secciones del horno en que se quema [18].

1.4 Fases de la Combustión en Lecho Fijo

En cualquier sistema de combustión, si una partícula combustible es expuesta al flujo de una corriente gaseosa caliente, sufre tres etapas de pérdida de masa como es: secado, devolatilización, y combustión del carbono [6].

1.4.1 Secado de Combustibles Sólidos.

La humedad en los combustibles sólidos puede existir de dos maneras: como agua libre en los poros y como agua adsorbida a la estructura interior del combustible [17]. Durante el secado las partículas de combustibles inicialmente experimentan un calentamiento hasta una temperatura casi constante cercana a los $100\text{ }^\circ\text{C}$, debido a que el calor transferido a la partícula sostiene exclusivamente el proceso endotérmico de evaporación. El calor necesario durante el secado es función directa de la cantidad de agua y la fuerza con que está ligada a las fibras de combustible [3].

1.4.2 Devolatilización de combustibles sólidos.

Cuando el secado de una pequeña partícula o una zona de una partícula grande culmina, la temperatura aumenta a $250\text{ }^\circ\text{C}$ [3] y el sólido comienza a descomponerse, dando lugar a la liberación de volátiles. Puesto que el flujo de

volátiles del sólido ocurre a través de poros, el oxígeno externo no puede penetrar en la partícula, y aquí la devolatilización es referida como una etapa de pirolisis. Los productos de pirolisis en un ambiente de combustión son principalmente: hidrocarburos de cadena corta, CO_2 , CO , H_2 y vapor de agua. En esta etapa se alcanza una temperatura de 600°C [3].

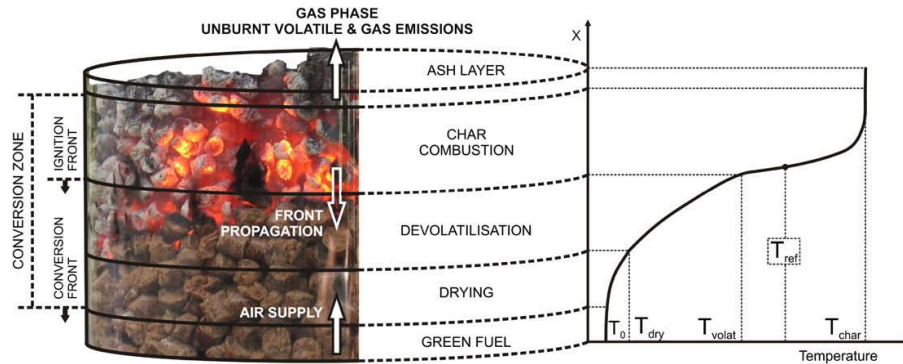
1.4.3 Combustión del material carbonizado.

El material sólido remanente de la etapa de devolatilización es denominado carbonizado, el cual está compuesto principalmente de carbono fijo y cenizas. Este material carbonizado reacciona con el oxígeno circundante alcanzando temperaturas cercanas a los 1200°C . Como el carbono es altamente poroso, el oxígeno puede difundirse por medio de la frontera externa del lecho y penetrar en las partículas del carbón, de esta manera, la velocidad de quemado depende de ambos efectos: de la velocidad de la reacción química entre el carbono y el oxígeno en la superficie del lecho y de la difusión interna del oxígeno en la partícula; la reacción en la superficie genera primariamente CO que reacciona fuera de la partícula para formar dióxido de carbono. La velocidad de esta reacción de oxidación depende de la concentración de oxígeno, temperatura del gas, número de Reynolds, tamaño y porosidad del carbón [6].

1.5 Propagación del frente de Flama

Los volátiles producidos durante la etapa de devolatilización reaccionan con el oxígeno exterior, produciendo una mezcla incandescente denominada flama. El flujo de calor y de reactivos químicos desde la fuente de ignición hacia las capas adyacentes del combustible, genera un proceso autosustentable que se manifiesta usualmente como un frente denominado "frente de flama". Dado que la flama es la expresión sensible de la combustión, su estudio provee información útil para ejercer un control adecuado en el desarrollo de la combustión aplicada.

Figura 2. Propagación frentes de conversión e ignición en horno de lecho fijo.



Fuente: Porteiro, J. Patiño, D. Collazo, J. Granada, E. Moran, J. “, Spain, 2004.

La conducción de calor en el combustible depende del gradiente de temperatura y puede demostrarse empíricamente que la distribución de temperaturas a través del lecho será siempre en forma de S [2]. La región inferior de la S se puede considerar como zona de precalentamiento, aquí el gas entrante recibe el calor desde la zona de reacción y al llegar a ésta el gas precalentado reacciona a su vez. De hecho la reacción sólo ocurre cerca de la región de más alta temperatura, es decir, en la parte superior de la S; después de unos minutos la velocidad de la parte frontal de encendido se estabiliza.

La parte superior de la fase sólida está ocupada por partículas de carbón que se oxidan por el aire que cruza el lecho. En la zona intermedia ocurre la desvolatilización de combustibles sólidos, es la etapa donde ocurre un fenómeno también conocido como pirolisis, los gases que salen de esta área son arrastrados por el aire que viaja a través de la capa de carbón para finalmente ser quemados en la fase de gas separado del lecho, generando así la llama.

En la parte inferior del frente de conversión, el combustible se calienta y seca por el calor conducido desde las capas superiores. Durante el proceso, cenizas y partículas de carbón son expulsados al aire abandonando el sistema; a esto se le conoce como decantación evitando la formación de una capa gruesa de cenizas

en la superficie [28]. En general, la llama se propaga acorde con el flujo de calor desde la zona de reacción hacia la zona de precalentamiento. Así, la llama se mantiene en un estado estacionario, lo cual facilita su análisis.

2. DESARROLLO EXPERIENTAL

Para establecer la influencia de las variables: tamaño de partícula y humedad, sobre el comportamiento de la combustión de bagazo de caña en lecho fijo, se establecieron cuatro etapas: i) pruebas en un horno prototipo con parámetros de diseño de una cámara de combustión Ward-Cimpa, ii) análisis del frente de flama para identificar las diferentes etapas de combustión, iii) cálculo de las tasas de combustión, temperaturas máximas, eficiencias de combustión y potencia de salida del horno y iv) análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.

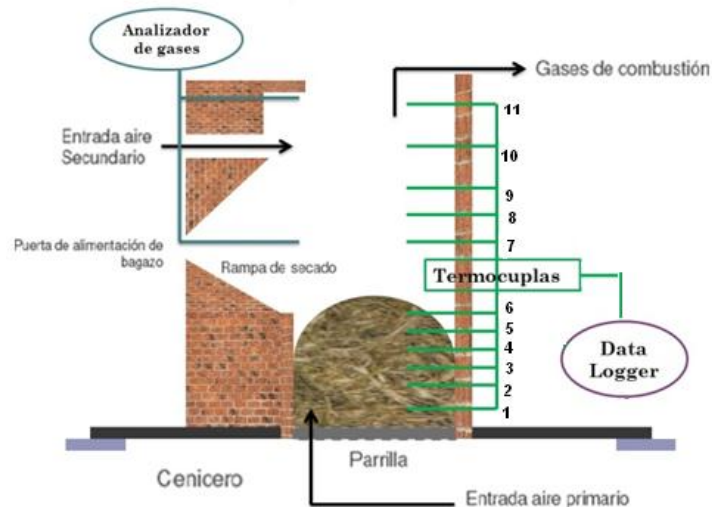
2.1 Etapa 1: Pruebas en el horno prototipo.

Para la etapa experimental del trabajo se diseñó y construyó un horno prototipo con los mismos parámetros de diseño especificados para una cámara de combustión Ward-Cimpa (ver figura 3), en las Instalaciones del Centro de Investigación Para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA) ubicado en el municipio de Barbosa (Santander). El horno fue construido con geometría rectangular, con una sección interna cuadrada de 30 cm de lado y una altura de 2,23 m; comprendidos desde la parrilla hasta la salida de gases. El horno fue previsto de dos entradas de aire: una primaria por la parrilla y una secundaria a través de dos orificios de 2" ubicados a 1,42 m de altura. El horno se construyó para permitir una altura máxima de lecho de combustible de 60 cm. Para sensar las temperaturas en el horno se ubicaron 11 termocuplas tipo K distribuidas así: 6 en el lecho de combustible, a una distancia de 10 cm entre ellas, y 5 distribuidas sobre el lecho hasta la salida de los gases. Las termocuplas fueron conectadas a un Datalogger el cual almacenó información cada 10 segundos. La composición de los gases de combustión se mido a la salida del horno con ayuda de un

anализador portátil de gases marca TESTO XL-350, con almacenamiento de datos cada 5 segundos.

Para el estudio se corrió un diseño factorial 3^2 , con repetición para un total de 18 experimentos batch (ver figura 4). Los niveles de tamaño de partícula se establecieron entre 1mm y 10 mm, mientras las humedades se variaron entre 11% y 45% en peso (base húmeda). Los flujos de aire primario y secundario fueron controlados con dos ventiladores centrífugos, los cuales se mantuvieron en caudales constantes de $0,0678 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,0752 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, con ayuda de un anemómetro con sonda de veleta marca Testo 350xl. Teniendo en cuenta la metodología establecida en otros estudios [12], se calculó el flujo másico de aire y se dividió en el área de la parrilla, para dar un flujo primario de $0,75 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ y un flujo secundario de $0,84 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ s}$. La carga del horno en cada experimento se realizó tal que se garantizara 1,5 kg de bagazo completamente seco.

Figura 3. Horno Prototipo

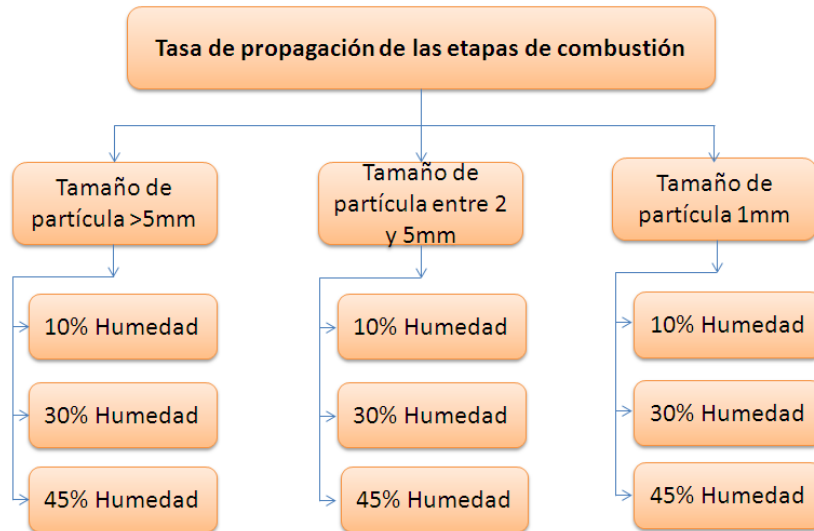


Fuente: Autores.

Cada prueba se iniciaba con la ignición del lecho de combustible por la parte superior y finalizaba cuando todo el combustible había sido consumido. Al finalizar

cada corrida se cuantifico la cantidad de material carbonizado presente en las cenizas; con la finalidad de establecer las pérdidas por inquemados.

Figura 4. Diseño experimental



Fuente: Autores

2.2 Etapa 2: Análisis del frente de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.

Para la identificación de los frentes se hizo un análisis de las temperaturas registradas por las termocúplas ubicadas en el lecho, siguiendo la metodología establecida por Porteiro *et al* [3]. Para determinar la velocidad de propagación del frente de flama primero se determinó la altura del lecho, y con esta la cantidad de termocúplas que se encontraban en su seno. Con ayuda del perfil de temperaturas se calculó el tiempo en que cada termocupla alcanzó la temperatura de referencia de 400 °C [25]. Por último se calculó el delta de tiempo en que tardaba el frente en

moverse entre dos termocuplas adyacentes y se determinó su velocidad como indica la ecuación (1):

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

Donde: v =Velocidad de propagación del frente de flama (m/s)

Δx = Distancia entre termocúplas (0,1 m)

Δt =Tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de referencia (s).

La velocidad de frente para cada prueba se determinó como el promedio de las velocidades encontradas entre cada intervalo de termocuplas.

Para la identificación de las etapas en el frente de flama se hizo por medio de la temperatura, ya que cada etapa se encuentra en un rango específico; secado (25-100 °C), devolatización (250-650 °C) y combustión de material carbonizado (700-1200 °C) [2]. Para el análisis de las etapas se miró de qué manera aumentaba o disminuía la temperatura con cada humedad, sabiendo que la cantidad de agua presente en el bagazo influye en gran parte.

2.3 Etapa 3: Cálculo de las tasas de combustión, temperaturas máximas, eficiencias de combustión y potencia de salida del horno.

La temperatura máxima de combustión durante cada prueba se determinó como el promedio de los picos registrados por las termocúplas ubicadas en el lecho de combustible, según la metodología establecida por Ligang *et al* [34]. La tasa de combustión se calculó dividiendo la masa de bagazo cargada en cada prueba sobre el tiempo en que tardo en consumirse y el área de la parrilla, como indica la ecuación (2).

$$Tasa\ de\ combustión = \frac{Carga\ de\ parrilla}{tiempo * Área\ de\ parrilla} \quad (2)$$

El tiempo de combustión se estableció con ayuda de los perfiles de concentración de CO₂, CO y O₂, teniendo en cuenta que para combustión de biomasa en operación batch las concentraciones tienden a ser estables mientras se presenta el frente de flama [34].

Para obtener las eficiencias de combustión, las pérdidas energéticas y la potencia entregada por el horno se desarrollaron los balances de masa y energía, cuyas ecuaciones se reportan en la tabla 1.

Tabla 1. Balances de masa y energía en el horno.

Balance por:	Ecuación	No.
Carbono	$\frac{0.47B}{PM_C} = Gy_{CO} + Gy_{CO_2} + I$	(3)
Hidrógeno	$\frac{0.065B}{PM_H} = 2 * (H_2O)_{formada}$	(4)
Nitrógeno	$0.79A = Gy_{N_2}$	(5)
Oxígeno	$\frac{0.44B}{PM_O} + 2(0,21A) = 2Gy_{CO_2} + Gy_{CO} + 2Gy_{O_2} + (H_2O)_{formada}$	(6)
Fracción Molar	$1 = y_{CO_2} + y_{CO} + y_{N_2} + y_{O_2}$	(7)
Balance Energía	$Q_b + Q_a + Q_{rx} = Q_g + Q_{pc} + Q_{\xi} + Q_{SI}$	(8)
	$B \int_{T^0}^{T_{25^0}} C_{p_b} dT + A \int_{T^0}^{T_{25^0}} C_{p_a} dT + Q_{rx}$ $= G \int_{T^0}^{T_{comb}} C_{p_g} dT + Q_{pp} + \xi \int_{T^0}^{T_{comb}} C_{p_{\xi}} dT + I \int_{T^0}^{T_{comb}} C_{p_c} dT$	(9)

Fuente: ODACYR BELENO, Mier; VELOSA ARIZA, Andrea. Diagnóstico del desempeño térmico de la hornilla piloto "WARD – CIMPA" utilizada en el proceso de producción de panela en Corpoica.2011 * Ver abreviaturas.

Eficiencia de combustión se calculó como la razón entre el calor de reacción (Q_{rxn}) y el máximo calor que es posible obtener de la biomasa [33].

$$E_c = \frac{Q_{rxn}}{PCI * B} \quad (10)$$

Las pérdidas por material inquemado y combustión incompleta se calcularon con ayuda de las ecuaciones (11) y (12) respectivamente [33].

$$P_{Inquemados} = \frac{Q_I}{PCI*B} \quad (11)$$

$$P_{CO} = \frac{Q_{CO}}{PCI*B} \quad (12)$$

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

2.4 Etapa 4: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.

Por medio de los cálculos, las graficas, y gracias al análisis de los mismos se introducen estos datos a un software que calcula la varianza y de esta manera se mira cual es el mejor experimento, determinando las mejores condiciones de operación para la combustión de bagazo en lecho fijo, permitiendo de esta manera dar posible solución a la ineficiencia del horno.

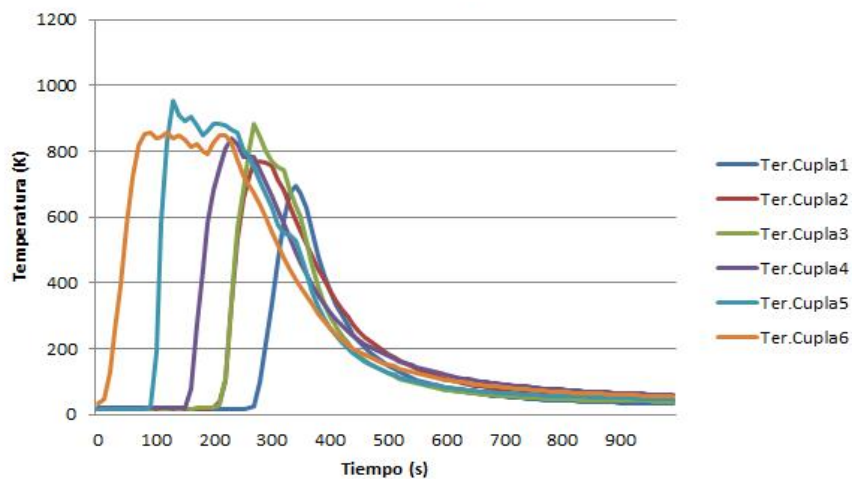
3. RESULTADOS Y ANALISIS

Después de realizadas las pruebas en el horno prototipo se obtuvo:

3.1 Etapa 2 Análisis del frente de flama para identificar las diferentes etapas de combustión.

En la figura 5 se encuentra representado un ejemplo de los perfiles de temperatura reportados en el lecho. El perfil muestra que la temperatura en cada termocúpla aumenta rápidamente desde temperatura ambiente hasta cerca de los 950°C, a medida que el frente se acerca a cada punto de medición; debido al calor liberado por la ignición del combustible y posterior quema de volátiles. Luego que el frente pasa la temperatura disminuye nuevamente debido a la pérdida de calor por los gases de combustión y la transferencia a las paredes internas del horno. Este mismo comportamiento se presentó para las demás humedades y tamaños de partícula.

Figura 5. Temperaturas del lecho de bagazo como una función del tiempo (tamaño de partícula > 5 mm y humedad del 10% en peso).



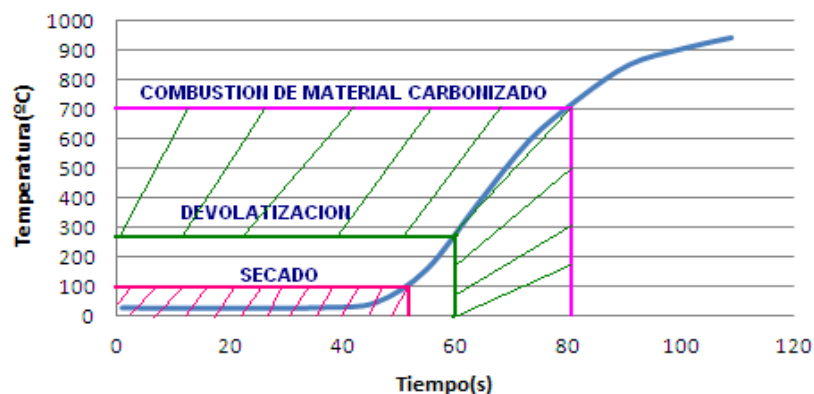
Fuente: Autores

Estos perfiles los presentan biomazas como madera y fueron presentados por LIGANG *et al* [34], concuerda con esta tendencia de aumento en la temperatura, pero diferencia el rango obtenidos obtenido para su estudio siendo 650°C para residuos solidos, caso similar con Galgano [19] con sus resultados reportados para la combustión madera y con Porteiro *et al* [2], con la combustión de cascara de almendra, pellets de álamo, viruta de pino entre otras biomasa de su estudio, que correspondieron con el comportamiento presentado por del bagazo de caña.

3.1.1 Identificación de las etapas

La figura 6 se puede identificar las diferentes etapas de la combustión a medida que el frente de flama se mueve dentro del lecho de bagazo. Inicialmente se presenta 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 la cual ocurre entre 250 y 650 °C. 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.

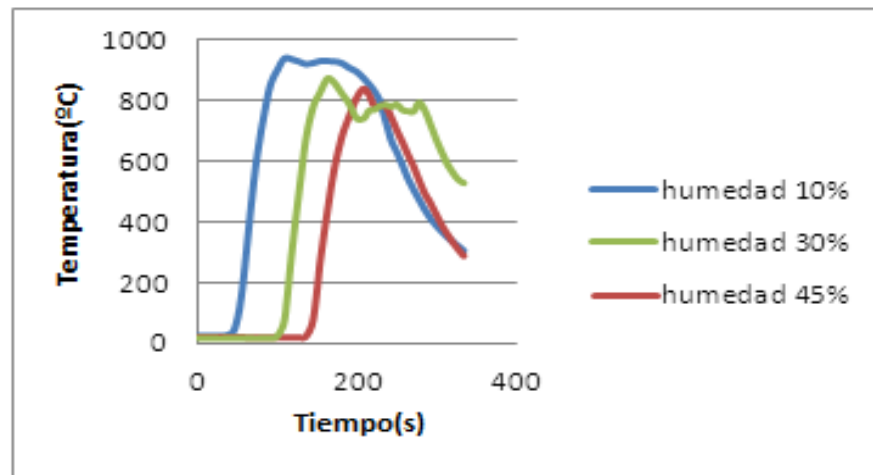
Figura 6. Diferentes etapas de combustión en el lecho de bagazo (tamaño de partícula > 5 mm y humedad del 10% en peso).



Fuente: Autores

Este mismo análisis se realizó para los demás tamaños de partícula y humedades, identificando en cada caso el punto de inflexión característicos de cada etapa y el tiempo en que tardo en ocurrir cada una, como lo indica la figura 7.

Figura 7. Temperatura del lecho como función del tiempo y la humedad (termocúpla No. 4).



Fuente: Autores

De la figura 7 se puede observar que a menor humedad menor es el tiempo que tarda la capa de lecho en incendiarse. Para una humedad del 30% se presenta un retraso de 62 segundos en la ignición, mientras que para el 45% se presenta un retraso de 97 segundos, con respecto al bagazo seco (10% de humedad). Este comportamiento se debe a que inicialmente el calor que se trasfiere a las partículas del bagazo sostiene exclusivamente la etapa de secado, evitando así su calentamiento.

Durante la devolatilización se presenta la mayor pendiente de la curva debido a que esta etapa es autosostenida con el calor liberado por la combustión de volátiles en el frente de flama. Las tres humedades presentaron pendientes similares, lo cual se puede comprobar observando que en este rango las tres curvas tienen una tendencia paralela. Lo anterior indica que a pesar que la

humedad retrasa el inicio de la volatilización, no influye notablemente en su velocidad.

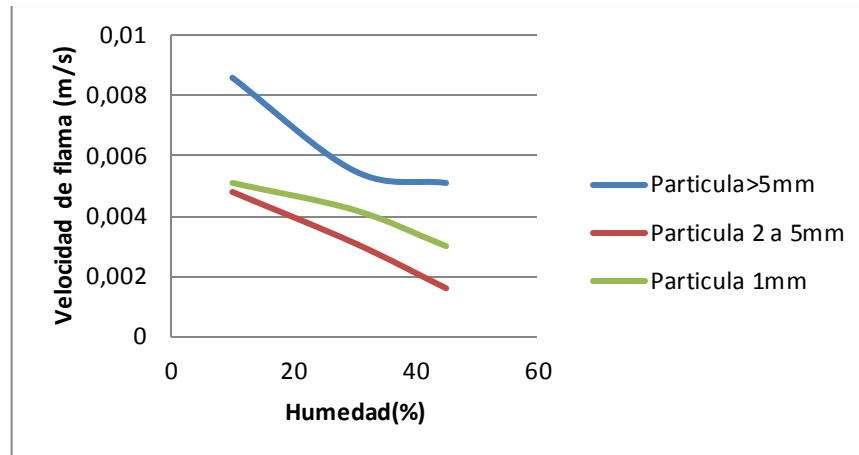
La máxima temperatura alcanzada en la etapa de oxidación presenta una tendencia inversamente proporcional al contenido de agua del bagazo. Este comportamiento se puede explicar de la siguiente manera: a mayores humedades mayor es la cantidad de calor que debe ser transportada desde el tope del frente de flama (oxidación de carbonizado) hasta la parte inferior (secado), disminuyendo de esta manera la temperatura de oxidación. Por otra parte a mayor humedad, mayor es el caudal de gases que se liberarán del lecho, lo cual genera un mayor enfriamiento de las partículas de carbonizado por convección Galgano [19].

3.1.2 Velocidad del frente de flama. (VF)

En la Figura 8 se puede observar el comportamiento de la velocidad del frente de flama con respecto a la humedad y el tamaño del combustible. A medida que se aumenta la humedad del bagazo se presenta una fuerte caída de la velocidad del frente. Esta tendencia se debe principalmente a que, como ya se dijo, un aumento en la humedad ocasiona un mayor retraso en la ignición del combustible y una mayor pérdida de calor por convección a los gases. Lingang *et al.* [34] encontró que para Residuos Sólidos Municipales (RSM) un aumento en la humedad del material ocasionaba una caída de la velocidad del frente de flama, debido a una reducción del contenido de material seco combustible y en consecuencia una disminución de su PCI.

Con respecto al tamaño de partícula, se puede apreciar que la velocidad de frente de flama es considerablemente superior para tamaños mayores a 5 mm comparados con los tamaños menores, aunque no se puede dictaminar que a medida que el tamaño disminuye lo hace de igual manera la velocidad de flama, puesto que las partículas de 1mm presentaron valores un poco mayores que a los tamaños entre 1 mm y 5 mm.

Figura 8. Velocidad del frente de flama como una función de la humedad y el tamaño de partícula.



Fuente: Autores

Porteiro *et al* [2] explica en su trabajo sobre combustión de diferentes biomasa en lecho fijo, que un aumento del tamaño de partícula ocasiona un aumento de la velocidad del frente de flama debido a que una mayor porosidad del lecho permite la formación de caminos por los cuales la flama se transporta más fácilmente. Por otro lado es posible que las partículas de 1mm, debido a su menor tamaño, quemen más rápido que las partículas cuyos tamaños están entre 2mm y 5 mm, ocasionando una mayor velocidad de propagación para el primero.

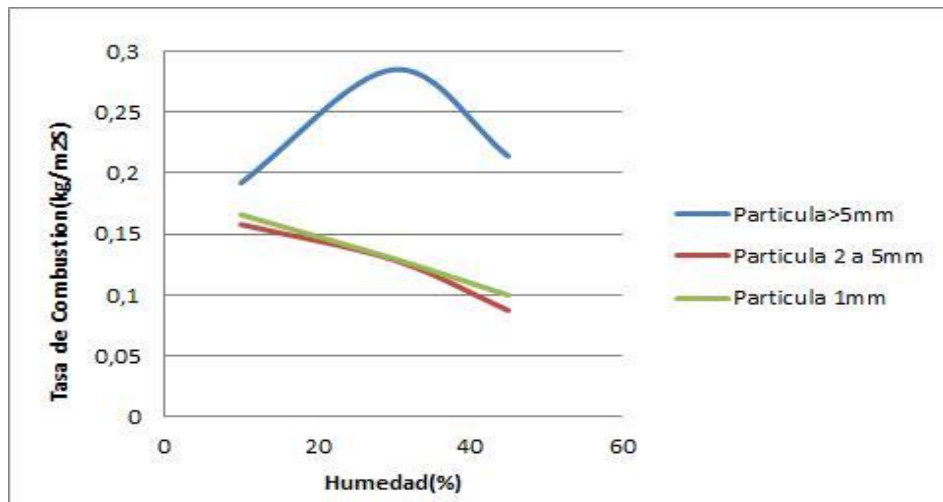
3.2 Etapa 3: Cálculo de las tasas de combustión, temperaturas máximas, eficiencias de combustión y potencia de salida del horno

3.2.1 Tasa de Combustión (TC)

La figura 9 describe el comportamiento de la tasa de combustión respecto a la humedad de los tres tamaños de partícula. Se puede observar que las mayores tasas de combustión la presentan las partículas con tamaño mayor a 5mm, las cuales presentaron un valor máximo con una humedad del 30%. No se ve una diferencia entre las tasas de combustión presentadas por las partículas con

tamaño entre 2 mm y 5mm y las de 1 mm, indicando que por debajo de 5 mm no presenta una dependencia del tamaño. También es claro de la figura que para tamaños menores a 5 mm el comportamiento de la tasa de combustión es lineal y decreciente con el contenido de agua del combustible.

Figura 9. Tasa de combustión como una función de la humedad y el tamaño de partícula.

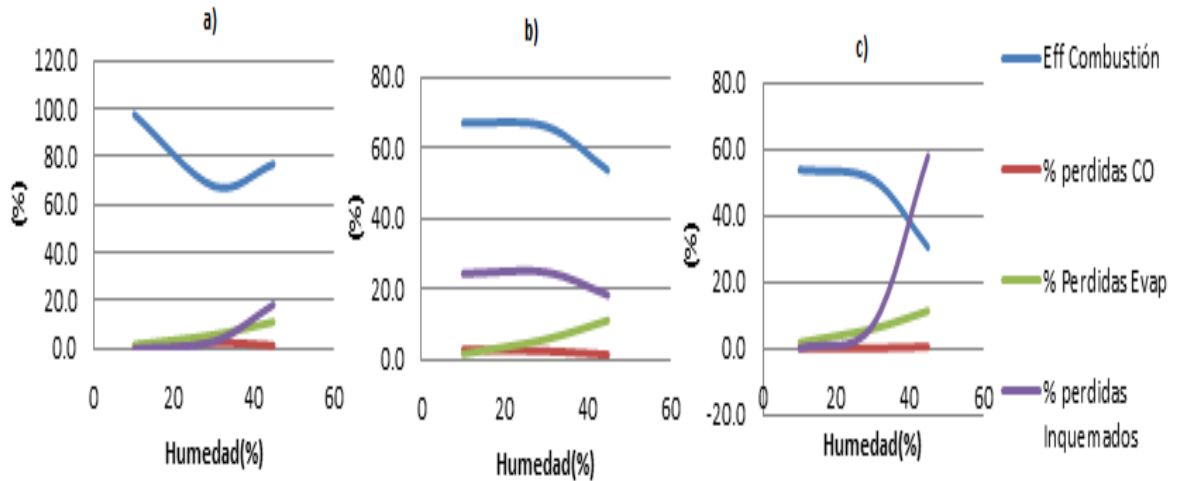


Fuente: Autores

Este comportamiento decreciente también fue encontrado en otros trabajos como el de Ligan *et al* [34] y Bryden y Hagge [24] sobre la combustión de otro tipos de biomasa. Los autores atribuyen la caída de la tasa de combustión al hecho de que el contenido de humedad retrasa el inicio de la combustión, aumenta la pérdidas de calor por evaporación, disminuye el PCI del combustible y aumenta la resistencia de la transferencia de calor hacia la partícula. El comportamiento diferente presentado por el tamaño mayor a 5 mm puede ser atribuido a la irregularidad de la partícula y a un aumento de la porosidad del lecho, lo cual como se explicó de la figura 9 ocasiona una mayor velocidad del frente de flama y en consecuencia, un mayor consumo de material, como lo explica Porteiro *et al* [2] en su trabajo.

3.2.2 Eficiencia de combustión (EC) y pérdidas en el sistema

Figura 10. Eficiencia de combustión y pérdidas energéticas: a) tamaño > 5 mm, b) tamaño entre 2mm y 5 mm y c) tamaño de 1 mm.



Fuente: Autores

La figura 10, muestra la eficiencia y las pérdidas generadas en el sistema para las diferentes humedades y los diferentes tamaños de partícula. Se puede observar que para los tres tamaños un aumento en la humedad ocasiona una caída en la eficiencia de combustión, debida principalmente a un aumento en la cantidad de carbono inquemado y pérdidas por evaporación. En los tres casos las pérdidas por combustión incompleta (formación de CO) se mantuvieron en valores bajos, y no superó el 3%. Las pérdidas por material inquinado, muestran un notable aumento para tamaños superiores a 2mm, y las pérdidas por CO muestran una leve disminución a medida que el tamaño de partícula aumenta. Para humedades del 10% los tres tamaños presentaron eficiencias similares cercanas al 95%, mientras que para bagazos con humedades elevadas (>30%), la combustión se puede ver favorecida utilizando tamaños de partícula por debajo de 5mm alcanzando eficiencias de combustión entre 70 y 90%.

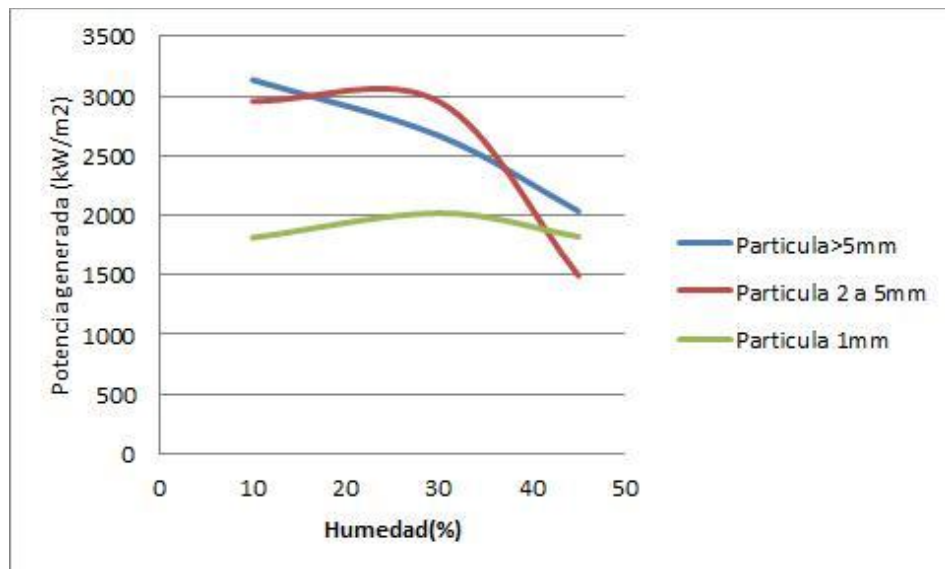
Esta tendencia en el aumento de pérdidas por material inquemado también fue encontrado en estudios anteriores sobre Cámaras de Combustión Ward Cimpa

[23]. Ryu y Khor [8], Toscano [10] y Johansson [29] explica que tamaños de partícula pequeños presentan mejores combustiones debido a un aumento en las áreas específicas del lecho (m^2 de área superficial de las partículas/ m^3 de lecho), mejorando así los fenómenos de transferencia de calor y masa.

3.2.3 Potencia Generada

En la figura 11 se observa el comportamiento de potencia generada con respecto al porcentaje de humedad para los tres tamaños de partícula.

Figura 11. Potencia entregada por el horno como un función de la humedad y el tamaño de partícula.



Fuente: Autores

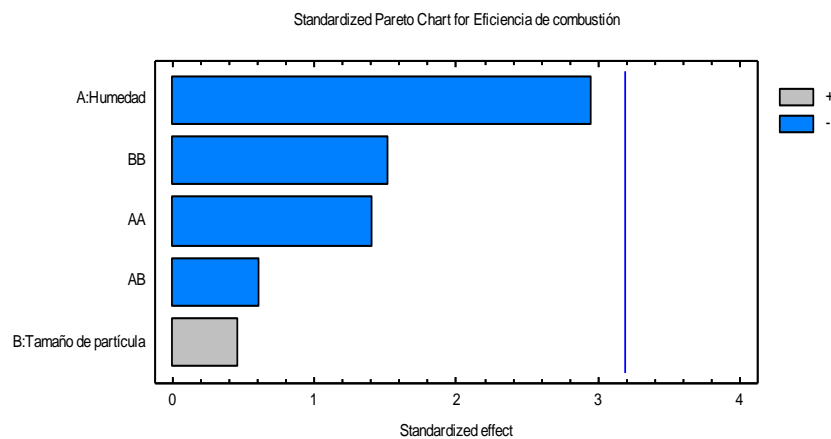
La figura muestra que mientras para los tamaños de partícula mayores a 1 mm la potencia entregada por el horno tiende a decrecer con la humedad, para el tamaño de 1mm la potencia se mantiene casi constante cerca de 2000 kW/m². Debido a que la potencia entregada por el horno es una función de la tasa de combustión y de su eficiencia, los tamaños mayores a 1mm presentan las potencias más altas con humedades entre el 30% y el 45%. Para humedades del 45% los tamaños mayores a 5 mm y 1mm presentan un valor similar de potencia, mientras el

tamaño de partícula entre 2mm y 5 mm presenta el menor valor de todas las pruebas (1500 kW/m²)

Resultados similares son reportados por Anthony [7] y Toscano [10], los cuales determinaron que un aumento en la humedad genera una gran caída en la potencia generada por los hornos de lecho fijo debido principalmente al calor perdido en la evaporación y por el material no quemado. Por otra parte el valor reportado por los tamaños mayores a 5 mm a 30% de humedad corresponde bien al parámetro de diseño utilizado por Corpoica en el diseño de cámaras de combustión el cual es de 3000 kW/m² [3]

3.3 Etapa 4: Análisis estadístico y determinación de las mejores condiciones de operación.

Figura 12. Análisis Diagrama de Pareto.



Fuente: Autores

El diagrama de Pareto de los efectos de las variables tamaño de partícula y Humedad sobre la eficiencia de combustión (figura 12), demuestran que la principal variación de la eficiencia es debida a la humedad del combustible y no se ve casi afectada por el tamaño de partícula. Esta conclusión se ratifica con el mejor ANOVA aplicando la prueba estadística F a un nivel de confianza del 95% (ver tabla 2)

Tabla 2. Resultado análisis ANOVA

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Humedad	686,94	1	686,94	6,79	0,0403
B:Tamaño de partícula	17,0017	1	17,0017	0,17	0,6960
Total error	606,821	6	101,137		
Total (corr.)	1310,76	8			

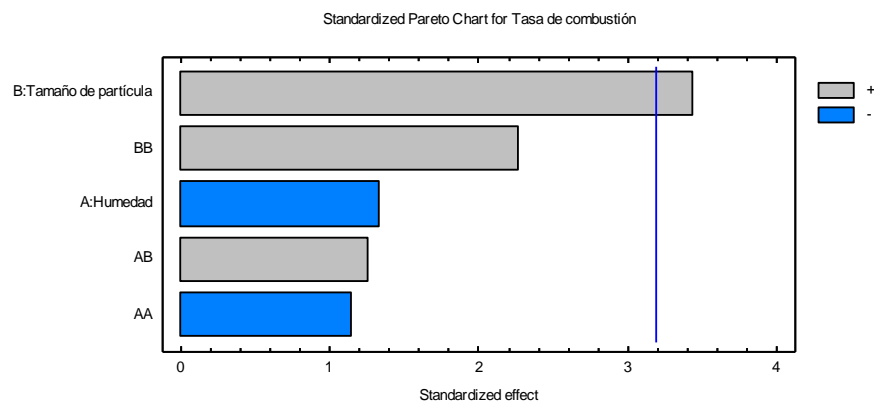
Fuente: Autores

El ANOVA muestra que el único efecto activo sobre la variable eficiencia es debido a la humedad del combustible, es decir que su variabilidad es consecuencia de la cantidad de agua del combustible y de los efectos aleatorios. La ecuación (13), muestra la correlación de la eficiencia en función de la humedad y el tamaño de partícula para las unidades codificadas.

$$E_c (\%) = 86,3444 - 10,7 * Humedad + 1,683333 * Tamaño de partícula \quad (13)$$

Donde Humedad y tamaño de partícula toman valores de -1, 0 y 1, siendo -1 en su nivel más bajo (10% y 1mm), 0 su nivel medio (30% y entre 2 y 5 mm) y 1 su nivel más alto (45% y > 5mm). El análisis estadístico de la eficiencia corrobora los resultados analizados en la etapa 2.

Figura 13. Análisis de Pareto



Fuente: Autores

El diagrama de Pareto para la tasa de combustión demuestra que la variable que más la afecta es el tamaño de partícula, lo cual se corrobora con el mejor ANOVA presentado en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación análisis ANOVA

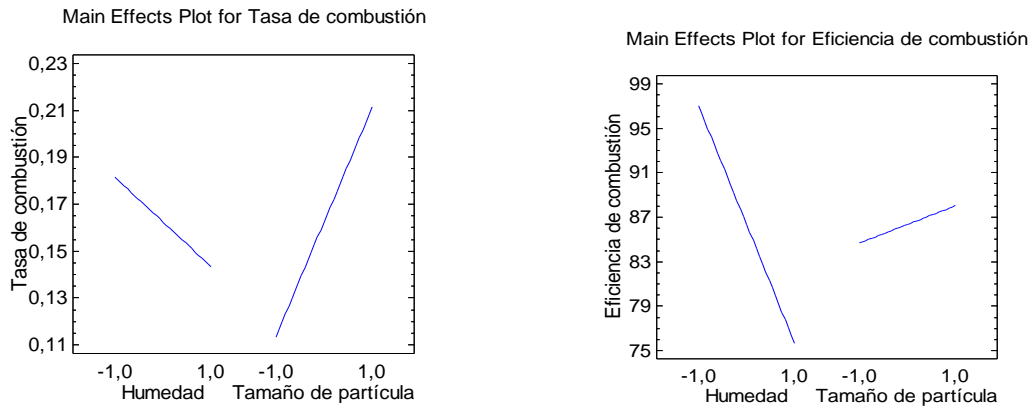
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Humedad	0,00218504	1	0,00218504	0,97	0,3638
B:Tamaño de partícula	0,0145042	1	0,0145042	6,41	0,0446
Total error	0,0135817	6	0,00226361		

Fuente: Autores

El ANOVA para este caso indica claramente que la variabilidad de la tasa de combustión es debida al efecto del tamaño de partícula y de efectos aleatorios. El análisis estadístico confirma los resultados físicos observados para la tasa de combustión en la etapa 2. La ecuación (14) presenta la correlación entre la tasa de combustión y las variables de estudio en unidades codificadas.

$$TC \left(\frac{kg}{m^2.s} \right) = 0,162389 - 0,0190833 * Humedad + 0,0491667 * Tamaño de partícula \quad (14)$$

Figura 14. Influencia de humedad y tamaño en eficiencia y tasa de combustión.



Fuente: Autores.

Las gráficas de efectos principales (figura 14) muestran que las mayores tasas de combustión se presentan cuando el tamaño de partícula se encuentra en su nivel superior (> 5mm) y la humedad en su nivel inferior (10%). Igual comportamiento

presenta la eficiencia de combustión, indicando que las mejores condiciones de operación del horno se consiguen con tamaños de partícula > 5 mm y humedades cercanas al 10%.

4. CONCLUSIONES

Con el aumento del contenido de humedad, la tasa de consumo de la carga alimentada disminuye así como el tiempo de ignición.

Cuando el alimento cargado es de 5mm y su contenido de humedad es bajo (10%), notablemente alcanza una tasa de ignición mucho mayor que para los otros tamaños y humedades superiores.

A medida que el frente de flama va consumiendo la carga total del lecho, la temperatura su incrementa debido a al calor proveniente de la zona de ignición y de la subsecuente quema de volátiles liberados de la combustión del bagazo en el frente de reacción.

Con el incremento de la humedad, la temperatura del frente de flama y la temperatura promedio del lecho disminuye, así como se consigue un aumento en el tiempo de secado (alcanzar 100 °C) en la primera etapa de combustión.

De los mecanismos de transferencia de masa y energía, la transferencia por radiación en el lecho es el más importante al inicio del frente de combustión y en la transferencia de calor hacia zonas mas frías del lecho.

La velocidad del frente de flama es mucho mayor en el tope del lecho que en el seno del mismo, mientras que la tasa de consumo de masa en el lecho es casi constante durante la primera etapa de combustión.

BIBLIOGRAFÍA

- [33] BELEÑO Odacyr, Mier; VELOSA ARIZA, Andrea. Diagnóstico del desempeño térmico de la hornilla piloto “WARD – CIMPA” utilizada en el proceso de producción de panela en Corpoica.2011.
- [17] BORMAN. Gary L, Combustion Engineering, Mc Graw-hill. 1998
- [1] BORRAY, Gonzalo. GOTTREL, Verónica. Correspondencia entre el desarrollo de tecnología para la agroindustria de la panela con el alivio de la pobreza y la protección del ambiente y los recursos naturales: el caso de la hoya del rio Suarez (Colombia). Barbosa, Santander.
- [24] BRYDEN K M, HAGGE M J. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle, Fuel, 82 (2003), p. 1633–1644.
- [21] DAOOD S.S, Munir S, Nimmo W, Gibbs B M. Char oxidation study of sugar cane bagasse, cotton stalk and Pakistani coal under 1% and 3% oxygen concentrations, Biomass and Bioenergy, 34(2010), p. 263-271.
- [7] E. J. Anthony. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology. Review Article. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 21, Issue 3, 1995, Pages 239-268
- [16] G. Antolin y D. Oliva. Caracterización del bagazo de caña de azúcar mediante análisis térmico. Información técnica, Vol 4,pag 91. 2003.
- [4] GARCÍA B. Hugo, PEÑA H. Adriana, LÓPEZ Z. Ricardo, DURAN S. Elizabeth, OLVERA C. Gloria. Desarrollo De Un Sistema De Evaporación Y Concentración De Jugos De Múltiple Efecto Para Mejorar La Eficiencia Térmica Y Productividad Y Disminuir El Impacto Ambiental En La Producción De Panela.

- [13] GARCÍA H. R, SÁNCHEZ Z, RODRÍGUEZ G. 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 principales regiones productoras de panela en Colombia”, presentado al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corpoica, C.I. Tibaitatá, 2009.
- [19] GALGANO A, DI BLASI C. Modeling the propagation of drying and decomposition fronts in wood, *Combustion and Flame*, 139 (2004), p. 16 – 27.
- [31] GÓMEZ TOVAR, Franco Hernán Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-cimpa y plana-cimpa en hornillas paneleras.2004
- [23] GONZÁLEZ A. Karime. Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos en hornillas paneleras Ward-Cimpa, en la hoya del río Suárez. Bucaramanga, 2010, Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería Química.
- [3] GORDILLO, Gerardo. GARCÍA, Hugo. “Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras”. Barbosa, Santander. 1992-07
- [14] Guía tecnológica para el manejo integral productivo del sistema de caña panelera, 2007.
- [27] GURGEL VERAS C A, Saastamoinen J, Carvalho JR J A, Aho M. Overlapping of the Devolatilization and Char Combustion Stages in the Burning of Coal Particles, *Combustion and Flame*, 116 (1999), p. 567 – 579.
- [9] HORTTANAINEN M. Saastamoinen J. Sarkomaa P. Operational Limits of Ignition Front Propagation against Airflow in Packed Beds of Different Wood Fuels. *Energy & Fuels* 2002, 16: 676-686.
- [32] HUGOTT, E. (s.f.). Manual para ingenieros azucareros.
- [29] JOHANSSON R, Thunman H, Leckner B. Influence of intraparticle gradients in modeling of fixed bed combustion, *Combustion and Flame*, 149 (2007), p. 49–62.

- [26] LIANG X H, Kozinski J A. Numerical modeling of combustion and pyrolysis of cellulosic biomass in thermogravimetric systems, *Fuel*, 79 (2000), p. 1477- 1486.
- [34] LIGANG LIANG, Rui Sun."Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed".*Bioresource Technology* 99 (2008) 7238–7246
- [22] MALDONADO R. Javier, RAMÍREZ B. Jorge. Creación de un sistema de transferencia de calor que genere vapor saturado a partir del uso directo de los gases de combustión de los trapiches Cimpa de la hoya del río Suárez. Bucaramanga, Trabajo de Grado. 2010.UIS.
- [5] MERENCIO O. Denny, GIRALDO A. Gregorio. Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado.
- [18] OCÓN Joaquín. TOJO Gabriel. Problemas de ingeniería química, operaciones básicas. Tomo 1. 1994.
- [2] PORTEIRO, J. PATIÑO, D. COLLAZO, J. GRANADA, E. MORAN, J. "Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor". Pontevedra, Spain, 2004.Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería Química. Bucaramanga. 2004.
- [12] 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, Bucaramanga, 2010, Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería Química.
- [8] RYU C, Yang YB, Khor A, Yates NE, Sharifi VN, Swithenbank J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I and Part II. Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 2006; 85:1039–46.
- [25] SAASTAMOINEN J, Richard J R. Simultaneous Drying and Pyrolysis of Solid Fuel Particles, *Combustion and Flame*, 106 (1996), p. 288-300.

[6] SOLER V. Juan Pablo, GÓMEZ T. Franco Hernán. Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA y plana-CIMPA en hornillas paneleras. Trabajo de Grado (Ingeniería química).

[15] Termodinámica y Termotecnia. Combustibles. Tabla 3.1 Disponible en <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>

[11] TORSTEN Frisk, Oficial Regional Forestal. Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile 1996.

[10] TOSCANO Morales. Luis, Ph. D BARRIGA Alfredo. Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa. Trabajo de Grado (Ingeniería Mecánica) Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción .Guayaquil. 2009.

[30] YANG, YAO Bin; Ryu, Changkook. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed, Fuel 84 (2005), p. 2026–2038

[28] YU J, Zhang M, Zhang J. Experimental and numerical investigations on the interactions of volatile flame and char combustion of a coal particle, Proceedings of the Combustion Institute, 32 (2009), p. 2037- 2042.

[20] ZABANIOTOU A, Damartzis T H. Modelling the intra-particle transport phenomena and chemical reactions of olive kernel fast pyrolysis, Journal of Analytical and applied Pyrolysis, 80 (2007), 187 – 194.