

# HORNILLAS PANELERAS WARD-CIMPA: VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE DISEÑO CORPOICA-UIS

---

Luz Esperanza Prada Forero<sup>1</sup>, Zamir Sánchez Castro<sup>2</sup>, Hugo Reynel García Bernal<sup>3</sup>, Harvey Steve Rojas Ávila<sup>4</sup>

## RESUMEN

Con el fin de facilitar el diseño de las hornillas paneleras, en el 2004, Corpoica y la UIS propusieron un modelo matemático, para el diseño de la cámara de combustión [1]. Posteriormente se validó este modelo, con un trabajo de investigación experimental cuantitativa, en el marco del proyecto “Desarrollo de Modelos de Hornillas Paneleras de Alta Eficiencia Térmica y Bajo impacto Ambiental” ejecutado por Corpoica y la UIS y financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Este trabajo se realizó, con una muestra representativa de las hornillas comerciales Ward-CIMPA que operan en la Hoya del Río Suárez, y permitió mejorar el modelo a través de un ajuste de las correlaciones establecidas para el exceso de aire y la cantidad de material no quemado. De esta forma el modelo ajustado, predice los parámetros de diseño de las cámaras de combustión con un nivel de confianza del 95%, donde los nuevos parámetros de operación son: periodo de alimentación del bagazo de 150 s, aire suministrado de 315 a 321 kmol aire/kg bagazo seco y excesos de aire de 58% a 61%.

**Palabras clave:** Diseño de hornillas, cámara de combustión, combustión, hornillas paneleras, hornilla panelera Ward-CIMPA, combustión del bagazo, eficiencia térmica.

## ABSTRACT

To facilitate the design of paneleros- burners, in 2004, Corpoica and UIS proposed a mathematical model for design of the combustion chamber. Later this model was validated, with quantitative experimental research job, in the framework of the project “Development of Models the paneleros-burners of high thermal efficiency and low environmental impact”, executed by Corpoica and UIS and funded by the Ministry of Agriculture and Rural Development. This job was conducted with a representative sample commercial of burners Ward-CIMPA, operating in the Suárez river basin, and improved the model, through adjust of set correlations for the excess air and the amount unburned material. Thus the adjusted model, predicts the design parameters of the combustion chambers with a confidence level of 95%, where new operating parameters are: period feeding bagasse 150 s, air supplied 315 to 321 kmol air /kg dry bagasse and air excess 58% to 61%.

**Keywords:** Design of Burners, chamber combustion, combustion, Panelerosburners, Ward-CIMPA burners, bagasse combustion, thermal efficiency.

---

1. Candidato a Magister en Ingeniería Química. Corpoica. Bucaramanga, Colombia. E-mail: lprada@corpoica.org.co

2. Candidato a Magister en Ingeniería Química. Corpoica. Bucaramanga, Colombia. ingzamirsanchez@gmail.com

3. MSc. Ingeniero Agrícola. E-mail: hgarciab@yahoo.es

4. Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. E-mail: harvey\_steven2002@yahoo.es

## 1. INTRODUCCIÓN

En la hornilla panelera, se genera y transfiere el calor necesario para concentrar en un sistema de evaporación abierta, el jugo de la caña; de tal forma que la cantidad de energía aprovechada, se relaciona directamente con el suministro de aire y bagazo, la eficiencia de la combustión, y la cantidad de energía disipada a los alrededores [2]. Estas variables de operación y transferencia, se relacionan entre sí y debido a su complejidad y cantidad, dificultan las tareas de manipulación y diseño de la hornilla.

Para facilitar el diseño de las hornillas paneleras, en los años ochenta, con base en simulaciones termodinámicas de la combustión del bagazo de caña a diferentes humedades, el Cimpa creó una herramienta de diseño, la cual ha sufrido varias reformas, donde se destacan las realizadas, conjuntamente por la Corporación colombiana de investigación agropecuaria (Corpoica-Cimpa) y la Universidad industrial de Santander (UIS-CEIAM), en 1991[3] y en el 2004[4].

En la primera, se implementó un sistema de archivos y ventanas de interface gráfica, en Visual Basic 4 y Windows 95, para facilitar el manejo de la herramienta; y en la segunda, con nuevos parámetros de diseño y operación, se creó un modelo matemático más riguroso para el diseño de la cámara de combustión Ward-CIMPA, utilizando Aspen Hysys.

Este modelo, fundamentado en estudios realizados bajo condiciones controladas en la hornilla piloto de Corpoica, tipo Ward-Cimpa, brinda información del flujo de gas, las temperaturas del horno y la eficiencia de la combustión; pero no tiene en cuenta variables como, la pérdida energética por material no quemado y el flujo de aire de alimentación del bagazo.

Con el objetivo de validar este modelo de diseño, en el 2010, en un trabajo de investigación experimental cuantitativa con un diseño de bloques al azar [5] [6], se evaluó la posición de la válvula mariposa, los periodos de alimentación del bagazo, la distribución de la energía suministrada y la potencia, a una muestra representativa de hornillas tipo Ward-CIMPA que operan en la Hoya del Río Suárez.

El análisis de los modelos de combustión del bagazo y de los datos obtenidos, permitió el ajuste del modelo matemático propuesto en el 2004 para el diseño de hornillas, estas propuestas de ajuste y los resultados obtenidos con un nivel de confianza del 95%, se presentan en este documento.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PANELERO

La producción de panela, se inicia en un molino de tres o cinco mazas, donde se obtiene hasta 65 kg de jugo por cada 100 kg de caña.

El jugo extraído se decanta para eliminarle las impurezas, una vez libre de tierra y bagacillo, se lleva a la hornilla y se le adiciona un floculante. Al calentarse el jugo, se coagulan algunas de las partículas coloidales dispersas en él. Estos coágulos no deseados en la panela, forman con el floculante, una nata llamada “cachaza”, la cual se remueve por métodos físicos.

El jugo clarificado, se continúa calentando, hasta convertirlo en miel. Esta miel adquiere una consistencia, color y olor característicos durante esta operación, debido a que no solo se evapora cerca del 80% del agua, sino que además, ocurren complejas reacciones, entre los componentes del jugo, como la inversión de la sacarosa y la caramelización de los azúcares.

Cuando la miel alcanza entre 92 y 96 °Brix, se retira de la hornilla y se bate. Si el producto deseado es panela granulada, la miel se bate hasta su solidificación; mientras que si se desea obtener panela en molde, entonces solo se realiza un leve batido, seguido del moldeo y enfriamiento de la miel, hasta su solidificación.

### 2.2 LA HORNILLA PANELERA

Tal y como se aprecia en la Figura 1, la hornilla panelera, está conformada, por el cenicero, la cámara, la chimenea y el ducto, sobre el cual se asientan directamente los intercambiadores de calor, en los que se deposita el jugo.

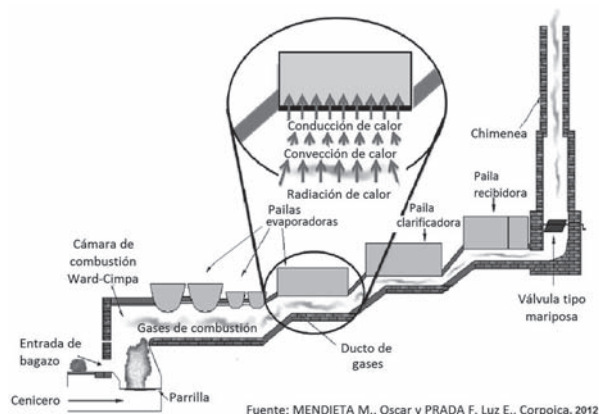


Figura 1. Partes de la hornilla Ward-Cimpa.

Cuando la hornilla es autosuficiente, solo requiere como combustible el bagazo de caña subproducto de la etapa de molienda, cuya composición media en base seca es: carbono 47%<sub>p</sub>, Oxígeno 44%<sub>p</sub>, Hidrógeno 6,5%<sub>p</sub> y cenizas 2,5%<sub>p</sub> [7].

La ignición del combustible, se produce sobre un lecho fijo, en la cámara de combustión tipo Ward o plana. La cámara tipo Ward diseñada por el Cimpa, utiliza directamente el bagazo que sale del molino, con humedades cercanas al 55%<sub>p</sub>; mientras que las cámaras planas Cimpa o tradicional, requieren para su funcionamiento, bagazo seco, con una humedad del 30%<sub>p</sub>.

La cámara tipo Ward-Cimpa, tiene un mayor volumen que la cámara plana-Cimpa y presenta dos sub-cámaras. En la sub-cámara primaria, se utiliza el aire primario, que ingresa del exterior a través del cenicero y la parrilla, para la combustión del bagazo, y en la sub-cámara secundaria, se utiliza un flujo de aire adicional, para oxidar el material no quemado y los volátiles sin reaccionar, que escapan del lecho [8].

Los gases calientes producto de la combustión, son arrastrados hacia el exterior por la chimenea; donde se ubica una válvula mariposa, para regular la velocidad con que viajan estos gases a través de la hornilla. En su paso través del ducto, los gases pasan parte de su calor a los intercambiadores y estos al jugo. El calor, que no es aprovechado por los jugos, se pierde en: la formación de CO, los gases de combustión, el material sin quemar y a través de los intercambiadores, arcos, paredes, y pisos.

## 3. MÉTODOS

### 3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La validación del modelo 2004 para el diseño de hornillas, se realizó en un trabajo de investigación experimental cuantitativa; con una etapa experimental y una explicativa; donde se analizaron y compararon los datos calculados con el modelo y los obtenidos en las hornillas.

La etapa experimental, se llevó a cabo en dos fases, una exploratoria y una experimental. En la primera fase, se calibraron los equipos y se determinó el diseño experimental, con base en los protocolos desarrollados por Corpoica-Cimpa para la evaluación de hornillas. En la segunda, cada experimentación duró 1 h y una estabilización previa de las condiciones de operación de la hornilla, de 0,5 h.

## 3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

La evaluación de las variables básicas de diseño, se realizó en una experimentación de bloques al azar, con un diseño factorial de 3x3, donde se trabajaron las siguientes variables:

### 3.2.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Apertura de la válvula mariposa (°), periodo de alimentación (s), flujos de alimentación del bagazo (kg/h), potencia alimentada (kW), volumen de la cámara (m<sup>3</sup>) y área de parrilla (m<sup>2</sup>).

### 3.2.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Exceso de aire (%), flujo másico de material particulado (kg/h) y composición (fracción volumétrica) de los gases de combustión, flujo másico de las cenizas (kg/h), temperaturas (°C), humedad del bagazo (%) y potencia generada (kW)

## 3.3 SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Se evaluaron 5 hornillas, que fue el tamaño mínimo de muestra que permitió asegurar repetitividad y exactitud, debido a los altos costos y requerimientos de tiempo que esta evaluación conlleva. En el Cuadro 1 se relacionan los trapiches seleccionados.

**Cuadro 1.** Nombre y ubicación de los trapiches evaluados.

Trapiche	Municipio
San Vicente	Barbosa
El Cable	Barbosa
San Antonio	Güepsa
Santa Bárbara	Suaita
San Sebastián	Vélez

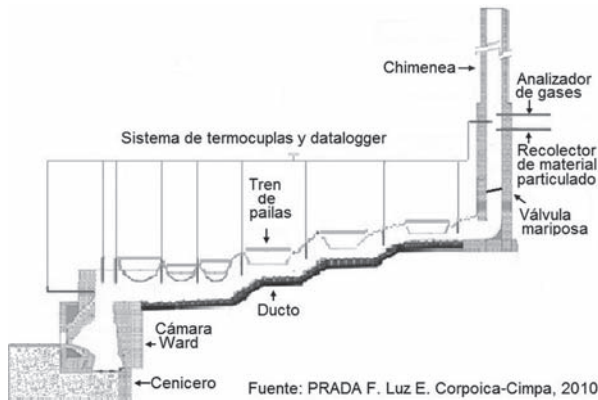
**Fuente:** Corpoica-Cimpa

En todos los trapiches de la muestra, se buscó las siguientes características:

- Cámara Ward.
- Igual potencia por unidad de volumen.
- Condiciones climáticas promedio similares: temperatura de 22°C, humedad relativa de 75%, altura de 1580 msnm y precipitación anual de 1800 mm/m<sup>2</sup>.

### 3.4 TOMA DE DATOS Y EQUIPOS

En la Figura 2 se observa, la ubicación de cada uno de los puntos donde se tomaron los datos experimentales. La medición de los datos en la chimenea se realizó a 2,2 m de su base.



**Figura 2.** Puntos de toma de datos en las hornillas Ward-CIMPA.

Para la medición de la composición de CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en los gases de combustión se empleó un analizador de gases Testo350K-L, con registros de 30 s, cada 5 min.

El material particulado (MP) en los gases de chimenea, se recolectó y cuantificó con el sistema desarrollado en el CIMPA [9]. De esta forma, en cada experimento, se introdujo en la chimenea, un tubo de acero inoxidable de 1 m de longitud y 1,27 cm de diámetro, con dos hileras opuestas de orificios de 1,27 cm de diámetro cada 2,54 cm, y una malla de hilos trenzados en acero inoxidable, número 200, sobre la hilera de la parte superior, donde se atrapa el MP, terminado el experimento se gira el tubo, se retira de la chimenea y se retira cuidadosamente el MP, el cual se cuantifica en una relación de áreas.

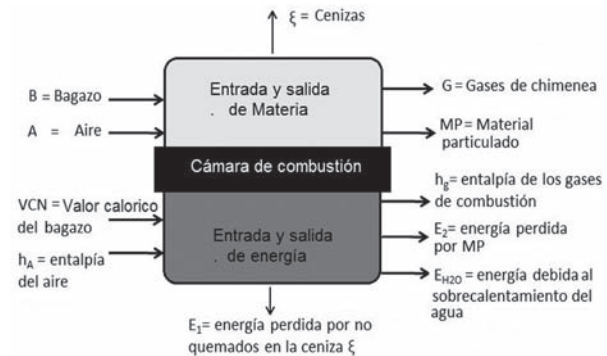
Para obtener el perfil de temperatura de la hornilla, se utilizó termocuplas tipo K, para lecturas de hasta 1200°C, conectadas a un Datalogger con el programa MicroScanV5 y registros cada 30 s.

El exceso de aire se varió, cambiando la posición de la válvula mariposa, en 30°, 45° y 60°, y se utilizó la misma cantidad de bagazo en todas las hornillas; el cual se pesó en una balanza electrónica y se alimentó en periodos de 90 s, 150 s y 210 s.

## 4. CÁLCULOS

### 4.1 MODELO MATEMÁTICO

Los Balances de materia y energía se realizaron aplicando las expresiones estequiometrias correspondientes a las entradas y salidas de materia y energía, que se muestran en la de la Figura 3.



Fuente:ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvin, 2004

**Figura 3.** Entrada y salida de materia y energía en la cámara de combustión.

Los cálculos, con el modelo matemático para el diseño de cámaras Ward 2004, se realizó con las ecuaciones reportadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Reacciones y Ecuaciones simuladas en el modelo matemático ajustado.

Reacción	N° Ec.
$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 393,509kJ^*$	(1)
$C_{(s)} + 1/2 O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)} + 110,525kJ^*$	(2)
$CO_{(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow CO_{2(g)} + H_2 + 41,166kJ^*$	(3)
$H_{2(g)} + 1/2O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} + 241,818kJ^*$	(4)
$X = 74.5 - 9x10^{-3}T$	(5)
$K_{eq} = (Y_{CO_2} Y_{H_2}) / (Y_{CO} Y_{H_2O})^{**}$	(6)
$K_{eq} = e^{\left(\frac{\Delta G_{fCO}^o + \Delta G_{fH_2}^o - \Delta G_{fH_2O}^o - \Delta G_{fCO_2}^o}{RT}\right)}$	(7)
$\frac{\Delta G_{fi}^o}{RT} = A_{gi} + B_{gi}T + C_{gi}T^2 + D_{gi}T^3$	(8)
$+ E_{gi}T^4 + \frac{F_{gi}}{T} + G_{gi} \ln T^{***}$	
$\sum \Delta H_{fi}^o = n_g \int_{298}^T C_{pi} dT$	(9)

**Fuente:** \* Calores de formación estándar. Smith et al.,1997, [10], [11].

Dónde:

- $C_{pi}$  = Capacidad calorífica del gas (kJ/kg°C).
- $n_{ges}$  = moles del gas de combustión.
- $K_{eq}$  = Constante de equilibrio.
- $T$  = Temperatura del horno (K).
- $X$  = Porcentaje de conversión de C a CO<sub>2</sub>.
- $Y_i$  = La fracción molar del compuesto  $i$ .
- $DG_{fi}^0$  = Cambios de energía libre de Gibbs.
- $\Delta H_{ri}^0$  = Calor liberado durante la reacción.

En la Tabla 2 se presentan los valores de las constantes de la correlación de Sharma, para el cálculo de  $DG_{fi}^0$ .

**Tabla 2.** Constantes para el cálculo de  $DG_{fi}^0$

Parámetro	Compuesto			
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>
$A_{gi}$	5.409019	-3.083139	-4.190672	4.346533
$B_{gi}$	-1.570x10 <sup>-3</sup>	-7.2134x10 <sup>-4</sup>	-1.5281x10 <sup>-3</sup>	-3.5003x10 <sup>-4</sup>
$C_{gi}$	2.130x10 <sup>-7</sup>	9.3847x10 <sup>-8</sup>	1.45504x10 <sup>-7</sup>	9.38971x10 <sup>9</sup>
$D_{gi}$	-1.995x10 <sup>-11</sup>	-8.488x10 <sup>-12</sup>	-1.0008x10 <sup>-11</sup>	7.6929x10 <sup>-13</sup>
$E_{gi}$	2.7817x10 <sup>-15</sup>	1.1518x10 <sup>-15</sup>	1.0653x10 <sup>-15</sup>	-2.63792e <sup>-16</sup>
$F_{gi}$	-4.8967x10 <sup>4</sup>	-1.4268x10 <sup>4</sup>	-2.9899x10 <sup>4</sup>	8.350340e <sup>2</sup>
$G_{gi}$	-4.453623	-3.025078	-2.672145	-2.9911423

Fuente: Sharma, 2008

La combustión del bagazo de caña, en el modelo matemático se describe, por medio de las cuatro primeras reacciones de la tabla, [12]; donde los cálculos se inician con la oxidación del carbono a CO<sub>2</sub> (Ec.1), entonces el carbono que no se convierte a CO<sub>2</sub>, se oxida totalmente a CO (Ec.2) y reacciona con el H<sub>2</sub>O para convertirse en CO<sub>2</sub> (Ec.3) y finalmente el hidrógeno de la biomasa se oxida a H<sub>2</sub>O (Ec. 4).

Puesto que la conversión del carbono, presenta un comportamiento lineal con respecto a la temperatura del horno (Ec. 5), y como dentro del horno se puede asumir que el gas alcanza el equilibrio termodinámico, entonces las concentraciones de los componentes se pueden calcular a partir de la constante de equilibrio (Ec.6). El valor de Keq se ajustó a partir del cálculo de los cambios de la energía libre de Gibbs para la formación de productos y reactivos (Ecs 7 y 8). Por último la temperatura del horno, se calcula a partir de un balance de energía (Ecs. 9).

Se utilizaron las expresiones estequiometrias de la Tabla 3, para calcular la potencia desarrollada y la formación de CO, CO<sub>2</sub> y el MP, de las hornillas evaluadas, cuando se les varió el exceso de aire y el periodo de alimentación.

**Tabla 3.** Ecuaciones empleadas en la validación del modelo.

	Expresión matemática	Nº Ec.
Balance de materia	$B_s = (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP) + 12/0,47 (YCO_2 + YCO) G$	(11)
	$B_s = (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP) + 2/0,065 (H_2O_{formada})$	(12)
	$0,44/16 (B_s) + 2,42 (A_{real}) = H_2O_{formada} + (2YCO_2 + YCO + 2YO_2) G + 0,44/16 (\%NQ_1 * \xi + \%NQ_2 * MP)$	(13)
	$1 = YN_2 + YCO_2 + YCO + YO_2$	(14)
	$A_{teórico} = (0,47/12 + 0,065/4 + 0,44/32) / 0,209B$	(15)
	$\Lambda_{Aire} = 100 (A_{real} - A_{teórico}) / (A_{teórico})$	(16)
Balance de energía	$VCN * m_b + h_A m_A - E_1 - h_g - E_2 - E_{H_2O} = 0$	(17)
	$VCN = 17850,5 - 20350 Hb / 100^*$	(18)
	$h_A = C_{Bs} (T_a - T_0) + C_{p_{H_2O}} H_A (T_a - T_0) + H_A \lambda_0$	(19)
	$E_1 = \%NQ_1 * \xi * VCN$	(20)
	$E_2 = \%NQ_2 * MP * VCN$	(21)
	$\eta = 100 h_g / (VCN + h_A)$	(22)
	$Pot = h_g / (3600 V)$	(23)

Fuente: Corpoica- Cimpa.  
\*Hugot, 1992

Dónde:

- $\Lambda_{Aire}$  = Aire en exceso (kmol).
- $A_{real}$  = Aire real suministrado (kmol).
- $A_{teórico}$  = Aire requerido para quemar B (kmol).
- $B_s$  = Bagazo seco suministrado (kg).
- $C_{Bs}$  = Calor específico del aire seco (kJ/kg°C).
- $E_1$  = Energía por no quemados en cenizas (kW).
- $E_2$  = Energía por no quemados en el MP (kW).
- $G$  = Gases de chimenea (kmol).
- $h_A$  = Entalpía del aire que entra (kJ/kg).
- $H_A$  = Humedad absoluta del aire (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>AS</sub>).
- $m_A$  = Masa de aire (kg).
- $m_b$  = Masa total de bagazo suministrado (kg).
- $m_{H_2O}$  = Masa de agua evaporada (kg).
- $MP$  = Material particulado (kg).
- $Pot$  = Potencia desarrollada por la cámara (kW).

VCN = Valor calórico neto del bagazo seco (kJ/kg).

$T_a$  = Temperaturas de entrada del aire (°C).

$V$  = Volumen de la cámara (m<sup>3</sup>).

$\lambda_0$  = Calor latente de evaporación del agua a la temperatura de referencia (kJ/kg).

$\eta$  = Eficiencia energética.

%NQ<sub>1</sub> = No quemados en la ceniza (%).

%NQ<sub>2</sub> = No quemados o MP en los gases de chimenea (%).

Puesto que las cámaras de combustión están construidas en ladrillo refractario se asumió el sistema como adiabático, con un coeficiente de conductividad térmica entre  $4,7 \times 10^{-4}$  y  $1,1 \times 10^{-3} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (Ec.17).

Y para el cálculo del valor calórico neto (Ec.18), se tuvo en cuenta la humedad del bagazo a la salida del molino, ya que esta depende del ajuste y tipo de molino.

## 4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó a los datos obtenidos en campo, en la literatura y en el modelo matemático; mediante una regresión lineal, con un nivel de confianza del 95%, para la prueba de la hipótesis de significancia  $F_{\text{real}} > F_{\text{crítico}}$ . Como indicativo indirecto de las variables de operación y diseño, se tomó la potencia por unidad de volumen.

# 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1 PERFIL DE TEMPERATURA

En todas las hornillas evaluadas, el perfil de temperatura vs el periodo de alimentación del bagazo, presentó un comportamiento oscilatorio, con una amplitud mínima y máxima, entre los 550 y 1000 °C, respectivamente. Esta oscilación en la temperatura de la hornilla, se debe a que la alimentación del combustible se realiza en un sistema por lotes.

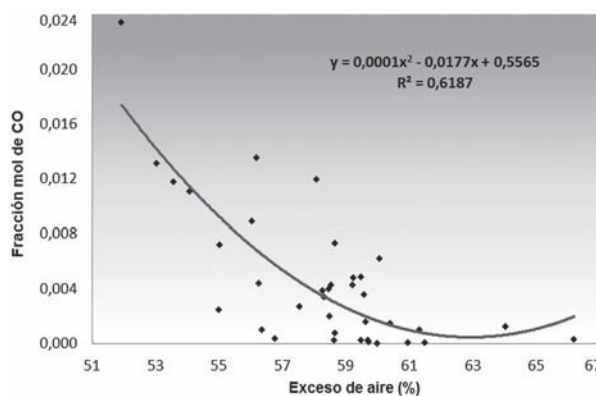
De esta forma cuando la cámara de la hornilla, se carga con el combustible frío, una parte de la energía se consume en su calentamiento; por lo que se registra un descenso de la temperatura. A medida que se quema el bagazo, la hornilla alcanza la temperatura máxima; pero cuando el combustible se consume, el área de parrilla libre aumenta y por ende aumenta la cantidad de aire frío que ingresa desde el exterior por la parrilla, por lo que nuevamente se presenta un descenso de la temperatura.

Así el número de oscilaciones, es inverso al periodo de alimentación del bagazo, y cuando la oscilación presenta una mayor longitud de onda, la hornilla alcanza un mayor tiempo de estabilidad en la temperatura más alta. Las condiciones más estables se encontraron,

con excesos de aire superiores del 58% y periodos de alimentación del bagazo de 150 s, donde se presentó en promedio 12 oscilaciones y una temperatura máxima promedio de 900 °C.

## 5.2 FORMACIÓN DE CO

En la Figura 4 se observa, que la mayor cantidad de CO, se forma con excesos de aire de 53%, y la menor cantidad, con excesos de aire entre 56% y 61%. La explicación a este comportamiento se encuentra, en el hecho de que cuando el exceso de aire es inferior al 56%, no se garantiza la cantidad de aire suficiente para completar la combustión y cuando el exceso de aire es superior al 61%, parte de la energía del sistema se utiliza para el calentamiento del aire entrante y por tanto la combustión del bagazo tampoco se completa.



Fuente: ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvin, 2004

Figura 4. Fracción de CO vs exceso de aire.

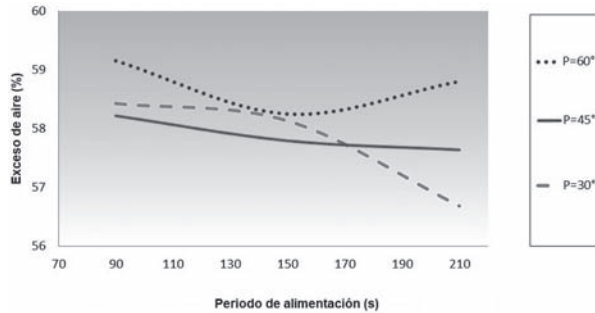
El planteamiento anterior se reafirma, al estudiar la formación de CO<sub>2</sub> vs el exceso de aire, pues tal y como se espera, este presenta un comportamiento inverso.

## 5.3 VARIACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

Los mayores contenidos de MP, se encontraron para excesos de aire del 55% y los menores entre el 55,4% y el 56%. Para explicar este comportamiento, hay que tener presente que el caudal de aire ejerce una fuerza contraria al peso del bagazo; por lo que a medida que avanza la combustión del bagazo, la posibilidad de arrastre del MP es mayor. Lo anterior es cierto, hasta el punto en que el exceso de aire, es insuficiente para completar la combustión, pues entonces nuevamente se incrementa el MP. De esta forma para humedades de bagazo superiores al 45%, se generan cantidades altas de material no quemado, que forma una capa de hollín sobre los intercambiadores.

### 5.4 VARIACIÓN DEL EXCESO DE AIRE

En la Figura 5, se aprecia como para un periodo promedio de alimentación del bagazo de 150s, se presenta para las tres posiciones de la válvula estudiadas, un exceso de aire semejante, de aproximadamente 58%, que corresponde a una entrada de aire  $0,315 \text{ kmol}_{\text{aire}} / \text{kg}_{\text{bagazo seco}}$ .

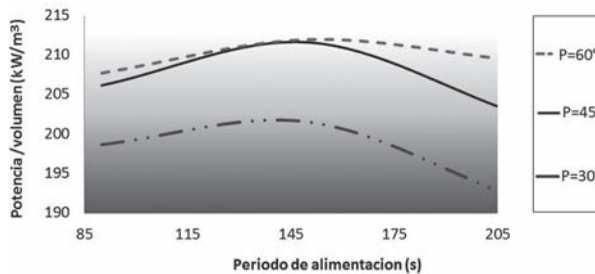


Fuente: ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvín, 2004

Figura 5. Exceso de aire vs periodo de alimentación.

### 5.5 POTENCIA DESARROLLADA

La potencia con respecto al periodo de alimentación, presenta para cada una de las tres posiciones de la válvula evaluadas, la misma tendencia y el mejor valor para periodos de alimentación de bagazo alrededor de los 150 s; como se observa en la Figura 6. Confirmando el dato anterior.

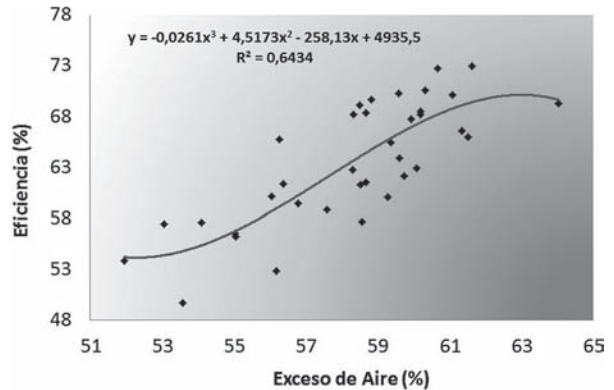


Fuente: ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvín, 2004

Figura 6. Potencia desarrollada/volumen vs periodo de alimentación.

### 5.6 EFICIENCIA

Al estudiar el comportamiento de la eficiencia con respecto al exceso de aire, se confirma la relación directa con la combustión del bagazo; ya que para eficiencias del 58% al 62% y para posiciones de 60° en la válvula, se presenta la mejor combustión del bagazo y las eficiencias alcanzan valores hasta de 73%, como se puede apreciar en la Figura 7.



Fuente: ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvín, 2004

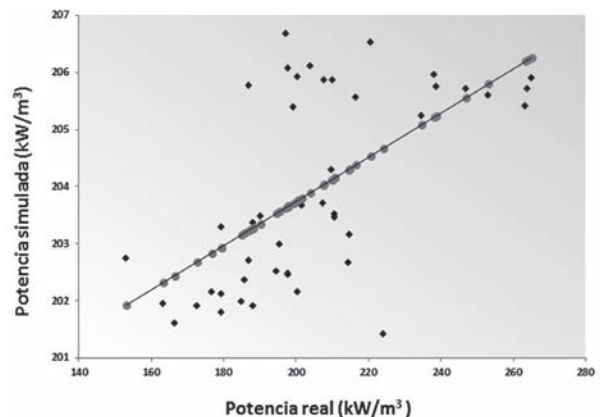
Figura 7. Eficiencia de la hornilla vs. exceso de aire

### 5.7 COMPARACIÓN DE DATOS REALES Y LOS OBTENIDOS CON EL MODELO MATEMÁTICO

La validación del modelo con los datos de campo, mostró que los parámetros de operación para las hornillas comerciales Ward-CIMPA, propuestos en el modelo ajustado del 2004, ofrece datos más cercanos a los de campo que el modelo sin ajustar; para el caso de la eficiencia este dato mejora en un 4%.

El volumen de cámara y área de parrilla, calculados a través del modelo ajustado, presentaron con respecto a las dimensiones reales, para un nivel de confianza del 95%, una varianza no significativa y un error relativo promedio de 2,6%.

La baja repetitividad y la dispersión en los datos de la potencia simulada con respecto a la obtenida con los datos reales, que se observa en la Figura 8, se debe principalmente al efecto de las variables de ruido que no se pudieron controlar y que no se tienen en cuenta en la simulación.



Fuente: ROJAS A. Harvey y CASTELLANOS T. Marvín, 2004

Figura 8. Curva de regresión ajustada para la potencia simulada vs potencia real

## 6. CONCLUSIONES

El análisis de varianza de los datos tomados en campo y los calculados, permitió establecer con un 95% de confianza, que el modelo matemático para el diseño de cámaras de combustión Ward-CIMPA, calcula las variables de operación relacionadas directamente con las variables básicas de diseño y describe el fenómeno termodinámico, con propiedad.

Se estimó que las pérdidas de calor en las hornillas Ward-CIMPA en promedio fueron: 29% en los gases de combustión, 7% a través de las paredes, pisos y arcos del ducto, 3% en la formación de CO, 6% a través de las paredes de la cámara de combustión, 1% en el material que queda sin quemar en cenizas y 0,96% en el material que queda sin quemar en los gases de chimenea.

Se encuentra aceptable un comportamiento lineal de los datos reales, con un coeficiente de correlación  $R^2$  del 37,3%; debido al ruido que ocasionan algunas variables que en este tipo de experimentación son difíciles de controlar, como es el estado físico de las hornillas, la variedad de caña utilizada, la velocidad y temperatura del aire en los alrededores de la hornilla y la extracción del molino, que determina el tamaño y la humedad del bagazo.

Se facilita el desempeño del operario y mejora la eficiencia promedio de la cámara, cuando se ajusta, el periodo de alimentación a 150s y la posición de la válvula mariposa a 60°. Estos parámetros de operación, permiten entradas de 0,315 a 0,321 kmol aire / kg bagazo seco, correspondientes a excesos de aire del 58% al 61%, con las que se alcanzan más de 900 °C en la cámara.

Se ajustó el modelo matemático con 5 nuevas correlaciones, en función del exceso de aire, determinadas a partir de datos tomados en hornillas comerciales para tres posiciones de la válvula mariposa, 30°, 45° y 60°. Las tres primeras se relacionan con los periodos de alimentación así:

- $\Lambda_{\text{aire}} = -0,00016f^2 + 0,03372f + 56,87859$
- $\Lambda_{\text{aire}} = 0,00004f^2 - 0,01573f + 59,50822$
- $\Lambda_{\text{aire}} = 0,0002f^2 - 0,0628f + 63,3541$

La cuarta describe las pérdidas energéticas por material particulado no quemado:

- $\%NQ_2 = MP/B_{\text{seco}} = 0,02771\Lambda_{\text{aire}}^2 - 3,2037\Lambda_{\text{aire}} + 89,39511$

Y la última describir la potencia

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

Las nuevas correlaciones permitieron mejorar hasta en 6.8% la eficiencia en la cámara Ward-CIMPA diseñada con el modelo 2004 ajustado, ampliar el uso del modelo a periodos entre 90 y 210 s, con excesos de aire de 52% a 63%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Corpoica- Cimpa. Diseñador riguroso de hornillas paneleras: Dr HORPA, Corpoica-UIS, versión 1. pdf. 2004. Editorial Produmedios. [http://www.corpoica.org.co/sitioweb/publicaciones/verpublicacion.asp?id\\_publicacion=936](http://www.corpoica.org.co/sitioweb/publicaciones/verpublicacion.asp?id_publicacion=936). Consultado 1 de mayo del 2013.
2. HOLMAN, J. P., Transferencia de calor. Capítulo 1 Compañía Editorial Continental S.A., México, 1995. 48p.
3. MAHECHA C. A., Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño óptimo de hornillas paneleras, Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, 1991. 78p.
4. CASTILLO M., Edgar F., GARCIA B., Hugo R., PRATO, Dorian. Desarrollo de un modelo matemático para el proceso de combustión de biomasa en hornos de parrilla estacionaria (tipo: Ward Cimpa y tradicional mejorada). Colombia. 2004. Memorias, VII Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la vida y su soporte natural mercados, producción y desarrollo verde, Universidad Industrial de Santander, p.392 - 400.
5. GONZÁLEZ A., Karime L. Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos, en hoyo del Río Suárez. Trabajo de grado (Ingeniera Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2010. 49p.
6. ROJAS A., Harvey S. y Castellanos T., Marvin A. Validación y ajuste de los modelos matemáticos



- de combustión generados por la UIS y Corpoica para cámaras de hornillas paneleras tipo Ward-CIMPA. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2010. 81p.
7. HUGOT, E., Manual para ingenieros azucareros. Traducido por Ruiz C., Carlos. Editorial continental, S.A., Sexta impresión. México 1992. 1067p.
  8. GARCIA, Hugo y GORDILLO, Gerardo. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa, 1992. 90 p.
  9. BENITEZ P., Eduardo. Evaluación comparativa de la cantidad de material particulado emitido por la chimenea y las condiciones de proceso en dos tipos de hornillas tradicional mejorada y Ward-cimpa. Trabajo de grado (Ingeniero agroindustrial). Facultad de ingenierías. Universidad de la Paz. Barrancabermeja, 2001. 89p.
  10. MELGAR, Andrés., PEREZ, Juan F., LAGET, Hannes y HORILLO, Alfonso. Thermochemical equilibrium modeling of a gasifying process. En ELSEVIER - Energy Conversion & Management. Vol. 48. 2007. Disponible en [www. Elsevier.com/locate/ enconman](http://www.Elsevier.com/locate/enconman) desde 10 julio del 2006. P 59- 67.
  11. SHARMA, Avdresh Kr. Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) falsifier. En ELSEVIER - Energy Conversion & Management. Vol. 49. 2008. Disponible en [www. Elsevier.com/locate/ enconman](http://www.Elsevier.com/locate/enconman) desde 17 de agosto del 2007. P. 832-842.
  12. SOLER V., Juan P., GÓMEZ T., Franco H. Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA y Plana-CIMPA en hornillas paneleras. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2004. 98p.

---

**Recepción:** 5 de diciembre de 2012  
**Aceptación:** 18 de diciembre de 2012