

**DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y SUS PUNTOS CRÍTICOS,  
EN HORNILLAS PANELERAS WARD-CIMPA EN LA HOYA DEL RÍO SUÁREZ**

**KARIME LIZETH GONZÁLEZ ARIZA**

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

**2010**

**DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y SUS PUNTOS CRÍTICOS,  
EN HORNILLAS PANELERAS WARD-CIMPA EN LA HOYA DEL RÍO SUÁREZ**

**KARIME LIZETH GONZÁLEZ ARIZA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniera Química**

**Directores**

**I.Q. M.Sc CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA**

**Universidad Industrial de Santander**

**I.A. M.Sc HUGO REINEL GARCÍA BERNAL**

**CORPOICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTADA DE CIENCIAS FÍSICO-QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2010**

## ACLARATORIA

El presente trabajo de tesis de grado "**Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos, en hornillas paneleras Ward-CIMPA en la Hoya del río Suárez**" forma parte del proyecto de Investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA: titulado "**Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela**" y fue coordinado, dirigido y financiado parcialmente por CORPOICA. Por tanto, los derechos de autor son de propiedad de la 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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Un sincero agradecimiento

A **DIOS**, por ser mi guía y protector, por su amor sin límites.

A, Universidad Industrial de Santander, mi alma mater.

A I. Q. M.Sc **Crisóstomo Baraja Ferreira**, Director UIS, por su contribución en el desarrollo de este proyecto.

A I.A. M.Sc **Hugo Reinol García Bernal**, Director CORPOICA, por su contribución para que este proyecto se llevara a cabo.

A la comunidad de la Estación Experimental CIMPA, especialmente a **Eugenio Koop Sanabria** por su apoyo y orientación durante el trabajo en campo.

A cada uno de los miembros del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales CEIAM.

A todas las personas que aportaron su apoyo y conocimiento para la realización y culminación de este proyecto.

## DEDICATORIA

A mis padres **Alicia y Antonio** por su amor, paciencia y comprensión; por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

Porque son mi gran ejemplo de compromiso y responsabilidad.

A mis hermanos **Fernando, Sandra y Jhon** por su amor y apoyo.

Los amo.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA PANELA	4
1.2 HORNILLAS PANELERAS	5
1.2.1 Zona de combustión	6
1.2.2 Zona de transferencia de calor	7
1.2.3 Chimenea	7
1.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR	8
1.4 COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LAS HORNILLAS PANELERAS	11
1.5 BALANCE ENERGÉTICO EN LAS HORNILLAS PANELERAS	11
1.5.1 Calor generado en la cámara de combustión	12
1.5.2 Calor perdido por combustión incompleta	13
1.5.3 Calor perdido por material inquemado en cenizas	14
1.5.4 Calor perdido por material particulado en gases de combustión	14
1.5.5 Calor suministrado real	15
1.5.6 Calor transferido a las pailas	15
1.5.7 Calor aprovechado	16
1.5.8 Calor disponible a través del ducto	17
1.5.9 Calor disipado a través de las paredes del ducto	18
1.5.10 Calor disipado a través de las paredes de la cámara de combustión	19
1.5.11 Calor perdido en chimenea	19
1.5.12 Eficiencia térmica del proceso	20
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	21
2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	22

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MONTAJES	22
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
3.1 VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA RESPECTO A LAS VARIABLES RESPUESTA	27
3.1.1 Variación de la eficiencia térmica global respecto a la posición de la válvula de chimenea y periodo de alimentación	27
3.1.2 Variación de la eficiencia térmica del proceso respecto al exceso de aire	28
3.1.3 Variación de la eficiencia térmica del proceso respecto a la humedad del bagazo empleado	29
3.2 PRUEBA DE RANGO MÚLTIPLE DUNCAN	30
3.3 VARIACIÓN EN EL CALOR PERDIDO EN LA HORNILLA RESPECTO A LA POSICIÓN DE LA VÁLVULA Y EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN	32
3.3.1 Energía de los gases de chimenea	32
3.3.2 Calor perdido por formación de monóxido de carbono (CO)	33
3.3.3 Calor perdido por material no quemado en gases de combustión	34
3.3.4 Calor perdido por material no quemado en cenizas	34
3.3.5 Calor disipado a través del ducto	35
3.3.6 Calor perdido a través de las paredes de la cámara	36
4 CONCLUSIONES	37
5 RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	42

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Diagrama de proceso panelero: segunda etapa	4
Figura 2: Cámara de combustión Ward-CIMPA	6
Figura 3: Válvula tipo mariposa	8
Figura 4: Energía aprovechada y perdida en las hornillas Ward-CIMPA en la Hoya del río Suárez	13
Figura 5: Posición de equipos en la hornilla	24
Figura 6: Eficiencia térmica Vs exceso de aire	28
Figura 7. Eficiencia térmica Vs Humedad de Bagazo	29

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Tipos de intercambiadores (pailas) empleados en la industria panelera	9
Tabla 2: Coeficientes globales de transferencia de calor para los diferentes tipos de intercambiadores (pailas) empleados en la industria panelera	10
Tabla 3: Cálculo de la capacidad calorífica de los componentes de los gases de Combustión	18
Tabla 4: Energía aprovechada y perdida en las hornillas evaluadas	25
Tabla 5: Análisis de varianza de la eficiencia térmica respecto a los factores operacionales posición de válvula (Pv) y periodo de alimentación (PA)	28
Tabla 6: Comparadores Duncan	31
Tabla 7: Combinación de variables	31
Tabla 8: Tabla de diferencias entre medias	32
Tabla 9: Análisis de varianza de la energía perdida por los gases de chimenea respecto a la posición de la válvula (Pv) y el periodo de alimentación (PA)	33
Tabla 10: Análisis de varianza del calor perdido por combustión incompleta respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación	33
Tabla 11: Análisis de varianza del calor perdido por material no quemado en gases de combustión respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación	34
Tabla 12: Análisis de varianza del calor perdido por material no quemado en cenizas respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación	35
Tabla 13: Análisis de varianza del calor perdido por disipación de energía a través del ducto respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación	35
Tabla 14: Análisis de varianza del calor perdido a través de las paredes de la cámara de combustión respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación	36

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A: PLANO DE UNA HORNILLA PANELERA WARD-CIMPA	43
ANEXO B: ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA CADA TIPO DE PAILA EMPLEADA EN LA INDUSTRIA PANELERA	44
ANEXO C: MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS EN EL DESARROLLO EXPERIMENTAL	48
ANEXO D: SISTEMA RECOLECTOR DE MATERIAL PARTICULADO	49

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y SUS PUNTOS CRÍTICOS, EN HORNILLAS PANELERAS WARD-CIMPA EN LA HOYA DEL RÍO SUÁREZ.\*

**AUTOR:** GONZÁLEZ ARIZA, Karime Lizeth\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Eficiencia térmica del proceso, hornilla panelera, gases de combustión, bagazo, válvula de chimenea, cámara de combustión.

### CONTENIDO

La importancia de mejorar la eficiencia térmica de las hornillas paneleras y el interés por encontrar la influencia de las condiciones de operación, han llevado al estudio de variables de diseño y la determinación del conjunto de factores operacionales que mejoren la transferencia de calor en la producción de panela.

En este trabajo se realizó una evaluación experimental en cinco hornillas para la producción de panela, ubicadas en la Hoya del río Suarez con el fin de cuantificar el porcentaje de energía aprovechada y perdida en este proceso, así como determinar los factores operacionales que tienen influencia directa en la eficiencia térmica de estas unidades productivas.

Experimentalmente se encontró el valor promedio de la energía transferida a los intercambiadores o pailas corresponde a 53% de la energía que suministra el bagazo alimentado, y las pérdidas registran valores de 29% el calor que acompaña a los gases de combustión, 7% el calor que se disipa a través de las paredes, pisos y arcos del ducto, 3% el calor que se pierde por formación de CO, 6% el calor disipado a través de las paredes de la cámara de combustión y por último 1% y 0,96% el calor perdido por el material que queda sin quemar en cenizas y aquel que es arrastrado junto con los gases (material particulado) respectivamente.

El mejor desempeño de la hornilla se consiguió con posiciones de válvula de chimenea de 60° con valores promedio de eficiencia térmica de 48%, aunque es independiente del periodo de alimentación, una combinación 60° y 150s registran los valores más altos de eficiencia térmica del proceso y temperatura de los gases en la cámara de combustión.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director I.Q. M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF LOSSES ENERGETICS AND THEIR TACTICALLY IMPORTANT POINTS, IN HORNILLAS PANELERAS WARD-CIMPA IN THE HOLE OF RIVER SUÁREZ.\*

**AUTHOR:** GONZÁLEZ ARIZA, Karime Lizeth\*\*

**KEY WORDS:** Thermal efficiency of the process, panelera burner, flue gas, bagasse, fireplace valve, combustion chamber.

### CONTENT

The importance of improving the thermal efficiency of the burners sugarcane and interest in finding the influence of operating conditions have led to the study design variables and the determination of all operational factors that improve heat transfer in the production of panela.

This paper reports a pilot evaluation in five burners for sugarcane production, located in the Hoya del Rio Suarez in order to quantify the percentage of energy harnessed and lost in this process, and identify operational factors that have direct influence thermal efficiency of these production units.

Experimentally, we found the average value of the energy transferred to the interchanges or pans up to 53% of energy supplied by the bagasse fed, and lost 29% with values of heat accompanying combustion gases, 7% heat dissipated through the walls, floors and arches of the product, 3% heat is lost through formation of CO, 6% heat dissipated through the walls of the combustion chamber and finally 1% and 0, 96% the heat lost by the material left in ashes and unburned who is dragged along by the gases (particulate matter) respectively.

The best performance was achieved with the burner valve positions stack of 60 ° with average values of thermal efficiency of 48%, but is independent of the feeding period, a combination 60 and 150s recorded the highest values of thermal efficiency of the process and gas temperature in the combustion chamber.

---

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physic Chemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Director I.Q. M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

## INTRODUCCIÓN

La producción de panela en el país se lleva a cabo en agroindustrias rurales en las cuales la tecnología y la mano de obra empleada en su proceso son poco sofisticadas. La elaboración del producto se realiza en economía campesina y además de elaborar un producto de gran consumo, vincula cerca de 370.000 personas<sup>1</sup>.

La eficiencia energética del proceso de elaboración de panela corresponde a la cantidad de energía aprovechada, de aquella que suministra el combustible (bagazo). Esta eficiencia se puede ver afectada por agentes como: combustiones incompletas, operaciones inadecuadas de la hornilla, disipaciones de energía por superficies no aisladas correctamente o con daños en sus estructuras, un mantenimiento inadecuado de la hornilla o por la ineficiente transferencia de calor en los intercambiadores (pailas) debido a su diseño. Esta deficiencia térmica se traduce, no solo en cantidades mínimas de calor aprovechado; este problema afecta otros factores dentro del proceso como son: bajos rendimientos en la producción, daños sobre el medio ambiente, mayores consumos de combustible y baja calidad del producto, conllevando a procesos no competentes en el mercado y por ende pérdidas económicas.

Los adelantos tecnológicos que se han tenido en estas unidades productivas se deben a los estudios llevados a cabo por la Estación Experimental para el Mejoramiento de la Producción Panelera CIMPA (E.E CIMPA), perteneciente a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA y cuyos trabajos en el área de producción panelera se extienden desde hace más de 20

---

<sup>1</sup> GARCIA B Hugo R. – ALBARRACIN C. Luis C. – TOSCANO LATORRE, Adriana. –SANTANA M. Natalia J. –INSUASTY B. Orlando. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. Tibaitatá. 2007

años. Bajo estos conceptos la E.E CIMPA ha logrado en las actuales hornillas con cámara Ward-Cimpa aumentar las temperaturas en la cámara de combustión de 850 a 1200°C y disminuir la temperatura de los gases de chimenea de 650 a 380°C, además reducir el consumo de combustible adicional hasta el punto que en algunas de ellas sobra bagazo.

La cuantificación de energía aprovechada y energía perdida, así como la determinación de los puntos en los cuales la concentración de energía perdida es mayor (puntos críticos) en las actuales hornillas paneleras Ward-CIMPA y la influencia de factores operacionales, mejoran su eficiencia térmica, de modo que alcanzan la autosuficiencia energética (trabajar solamente con el bagazo producido) y disminuyen el esfuerzo físico de los operarios.

El objetivo general del trabajo fue evaluar la eficiencia térmica del proceso y los puntos en los cuales se concentran las mayores pérdidas energéticas en las hornillas paneleras Ward-CIMPA, y como específicos: medir mediante pruebas experimentales en una muestra representativa de hornillas Ward- CIMPA en la HRS, las pérdidas energéticas en los puntos críticos o puntos de mayor concentración en los cuales se generan y determinar la influencia de factores de operación (posición de válvula de chimenea y periodo de alimentación) en la eficiencia térmica del proceso de elaboración de panela

En este trabajo se presenta un marco teórico referente a la descripción del proceso de elaboración de la panela, las zonas que componen la hornilla panelera y las bases teóricas de la transferencia de calor, haciendo una descripción de las relaciones matemáticas para el cálculo de energía aprovechada y energía perdida en el proceso; la fase experimental llevada a cabo mediante un diseño de bloques aleatorizados y un diseño factorial 3x3 realizados en cinco unidades experimentales, y como resultados los porcentajes de energía aprovechada en el proceso y los porcentajes de energía perdida en la zona de combustión, la zona

de transferencia de calor y la chimenea, para cada una de las combinaciones de los parámetros operacionales evaluados.

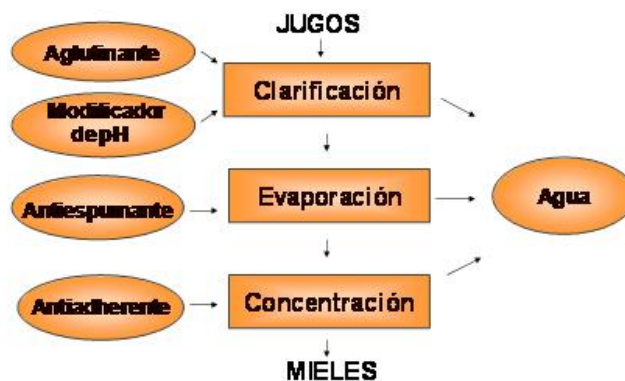
## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA PANELA

La producción de panela es una de las agroindustrias rurales de mayor tradición en Colombia. La producción de miel o panela se puede dividir en 3 etapas. La etapa inicial se realiza a temperatura ambiente, en ella se utiliza la caña panelera como materia prima para obtener el combustible y los jugos requeridos para el proceso.

Para la segunda etapa del proceso, el bagazo generado suministra la energía requerida; en esta etapa se realizan las operaciones del diagrama de proceso mostradas en la Figura 1:

Figura 1: Diagrama de proceso panelero: segunda etapa



Fuente: Prada. Corpoica-CIMPA. En Memorias V Curso de caña panelera y su agroindustria.2001

La clarificación es la operación en la cual, por efecto del calor, algunos sólidos coloidales y colorantes se aglutinan y flotan en la superficie de los jugos, de forma

tal que permite su remoción por métodos físicos. En esta operación los jugos se calientan desde temperatura ambiente hasta su temperatura de ebullición.

La evaporación es la operación que presenta el mayor consumo calórico del proceso y requiere adición de antiespumante.

Para la concentración de las mieles, se requiere velocidades de calentamiento entre 0,5 y 0,7°C/min. El punteo se realiza hasta una concentración entre 90-94°Brix y temperaturas entre 116 y 125°C.

Mientras para la concentración de las mieles en la producción de panela, se requiere la adición de antiadherente, y velocidades de calentamiento entre 0,7 y 0,9°C/min. El punteo para panela se realiza al alcanzar una concentración entre 66-72°Brix, que corresponde a 102 - 104°C.

La tercera etapa de proceso requiere el máximo cuidado higiénico, se inicia cuando las mieles alcanzan el punto adecuado, momento en el cual se retiran de la fuente de calor para realizar las operaciones de batido o moldeo y empaque, según el producto deseado.

## **1.2 HORNILLAS PANELERAS**

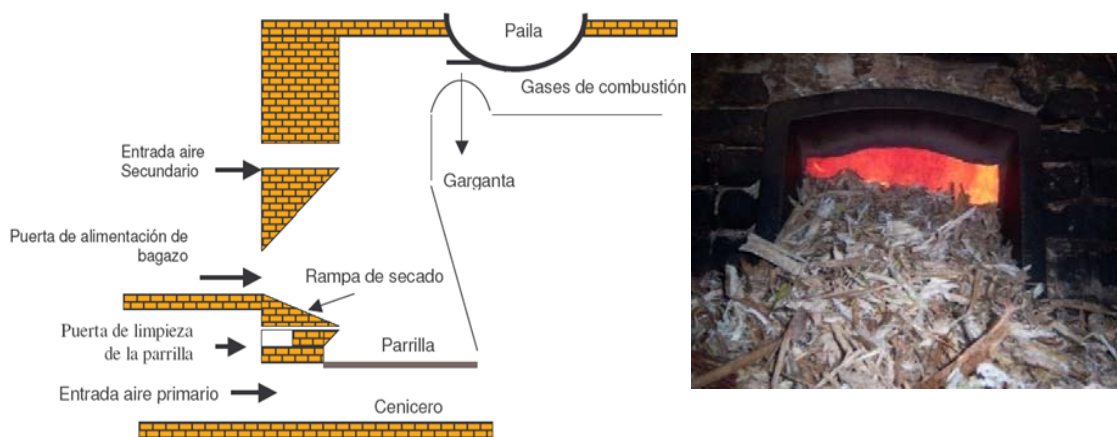
La hornilla u horno panelero, es el implemento del trapiche encargado de transformar la energía del combustible (bagazo) en energía térmica, la cual se suministra para llevar a cabo la segunda etapa del proceso. Térmicamente esta dividida en tres zonas:

### 1.2.1 Zona de combustión

En esta zona se llevan a cabo las reacciones entre el combustible (bagazo) y el comburente (aire). Consta de boca para alimentación del combustible, parrilla que soporta el lecho de bagazo y permite el paso del aire y, un cenicero que permite la entrada de aire principal y recibe la ceniza.

Las cámaras tipo Ward-CIMPA se construyen en ladrillo refractario y en ellas se distinguen dos subcámaras, la primera constan de una rampa de presecado donde se elimina el agua intersticial y se realiza la combustión.

**Figura 2: Cámara de combustión Ward-CIMPA**



Fuente: Hernández Restrepo. Corpoica-CIMPA.

El espacio entre la garganta y la primera paila se denomina segunda cámara donde se completa la combustión. Este tipo de cámara puede utilizar bagazo con una humedad superior a 45%, y fueron diseñadas según las modificaciones técnicas implementadas por la estación experimental CIMPA (E. E CIMPA).

### **1.2.2 Zona de transferencia de calor**

La zona de transferencia de calor esta constituida por el ducto y los intercambiadores de calor (pailas), los gases calientes provenientes de la cámara de combustión circulan a través del ducto y ceden parte de su calor sensible a los jugos en cada una de las etapas del proceso.

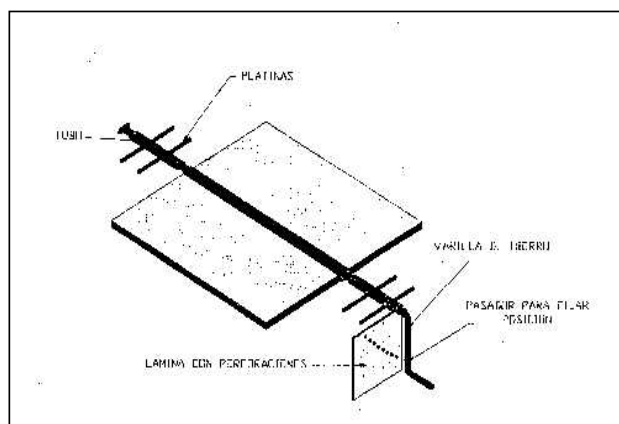
Las temperaturas más altas de los gases en una hornilla panelera se registran en la cámara de combustión y disminuyen a través del ducto a medida que estos se acercan a la chimenea.

La transferencia de calor es convectiva entre los gases y los intercambiadores y conductiva entre los jugos y los intercambiadores.

### **1.2.3 Chimenea**

Terminada la sección del ducto, los gases son expulsados al ambiente a través de la chimenea, que es un conducto construido en ladrillo o en ladrillo y lámina de hierro. Su forma puede ser cilíndrica, trapezoidal o cónica. Su función es crear una diferencia de presión, llamada tiro, que garantice el suministro del aire necesario para la combustión del bagazo y el transporte de los gases a través del ducto y el cual esta regulado por la válvula tipo mariposa o válvula de chimenea.

**Figura 3: Válvula tipo mariposa**



Fuente: GORDILLO A., G. y GARCÍA B. Corpoica-CIMPA

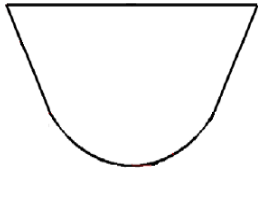
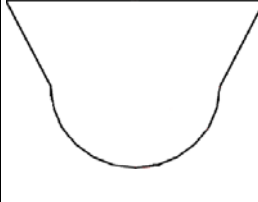
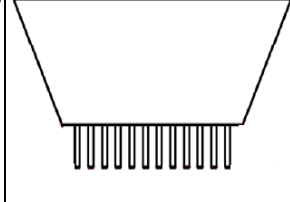
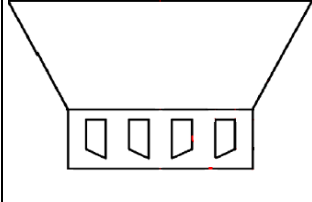
El término tiro denota la diferencia de presión que existe entre la presión atmosférica y la de los gases de combustión dentro de la hornilla. Es causado por la diferencia entre la densidad del aire y la de los gases calientes de combustión.

### 1.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores empleados en la industria panelera corresponden a intercambiadores abiertos llamados comúnmente "pailas" en las cuales se deposita los jugos que van a ser concentrados.

Existen diferentes tipos de intercambiadores y estos se seleccionan de acuerdo a las necesidades de producción de panela y la función que van a desempeñar: evaporación, clarificación o concentración. Los tipos de pailas existentes, presentan a una geometría específica y corresponden a: semiesféricas, semicilíndricas, planas aleteadas y piro-tubulares, como se observa en la tabla

**Tabla 1: Tipos de intercambiadores (pailas) empleados en la industria panelera**

Semiesférica	Semicilíndrica	Plana Aleteada	Piro tubulares
			
Tradicional	Tradicional	Modificados por CIMPA	Modificados por CIMPA

Fuente: Tomado y adaptado de: Hernández Restrepo. Corpoica-CIMPA.

Mediante la ley de enfriamiento de Newton se puede obtener una expresión que relacione la transferencia total de calor con la diferencia de temperaturas entre los fluidos caliente y frío, haciendo uso del coeficiente global de transferencia  $U$  en lugar del coeficiente único de convección  $h$ , a partir de la siguiente ecuación de diseño para los intercambiadores:

$$d_A = d_Q / U \Delta T \quad (2.1)$$

Donde  $d_A$  es un elemento de área superficial requerido para transferir una cantidad  $d_Q$  de calor en un punto del intercambiador en el cual el coeficiente global de transferencia es  $U$  y la diferencia global de temperaturas entre las dos corrientes es  $\Delta T$ , que generalmente se toma como la media logarítmica *DMLT*.

Por lo tanto la transferencia de calor en los intercambiadores esta dada por la siguiente expresión matemática:

$$q = U A \Delta T_m \quad (2.2)$$

Donde  $\Delta T_m$  es la diferencia de temperaturas media o media logarítmica DMLT, dado que  $\Delta T$  varía con la posición en el intercambiador se hace necesario hacer uso de esta expresión:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{c,i} - T_{h,o}) - (T_{c,o} - T_{h,i})}{\ln\left(\frac{T_{c,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{h,i}}\right)} \quad (2.3)$$

Según los estudios realizados en 2004 por la E.E CIMPA, los valores de U y DMLT para cada tipo de intercambiador son:

**Tabla 2: Coeficientes globales de transferencia de calor para los diferentes tipos de intercambiadores (pailas) empleados en la industria panelera**

Tipo de intercambiador	$U$ [W/m <sup>2</sup> °C]	Intervalo de temperatura [°C]	$DMLT$ [°C]	Intervalo de temperatura [°C]
Semiesférica	$74,5 \pm 6$	$730 < T_{prom} < 970$	$-61,887 + 0,911 \times T_e$	$780 < T_e < 1020$
Semicilíndrica	$25,1 \pm 4,6$	$350 < T_{prom} < 500$	$-2339,98 + 437,147 \times \ln(T_e)$	$370 < T_e < 760$
	$200,94 \pm \frac{85831}{T_{prom}}$	$500 < T_{prom} < 660$		
Plana Aleteada	$17,1 \pm 2,1v$	$500 < T_{prom} < 600$	$-54,057 + 0,886 \times T_e$	$510 < T_e < 860$
	$21,3 \pm 1,4$	$600 < T_{prom} < 820$		
Pirotubular	$32,5 \pm 2,2$	$500 < T_{prom} < 760$	$-60,555 + 0,852 \times T_e$	$560 < T_e < 850$
T <sub>e</sub> : Temperatura de entrada de los gases a la paila, [°C], T <sub>prom</sub> : temperatura promedio [°C]				

Fuente: Tomado y adaptado de: Hernández Restrepo. Corpoica-CIMPA.

## 1.4 COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LAS HORNILLAS PANELERAS

El bagazo es el residuo sólido obtenido de la extracción de los jugos de la caña panelera, la humedad cuando sale del molino varía en proporción inversa al nivel de extracción, el cual es función del contenido de fibra de la caña para condiciones constantes de operación del molino.

De acuerdo con Hugo<sup>2</sup>, la composición química elemental promedio del bagazo seco corresponde a 47% carbono, 44% oxígeno, 6,5 % hidrógeno y 2,5% cenizas. Dado que el bagazo es un combustible sólido, su poder calorífico es función de su composición química elemental y del contenido de humedad.

Para el cálculo del valor del poder calorífico se emplea la siguiente ecuación matemática<sup>3</sup>

$$VCN = 17,765 - 20,2 \times \left( \frac{H_B}{100} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

$VCN$ : Valor Calorífico Neto del bagazo húmedo, MJ/kg

$H_B$ : Humedad del Bagazo, %

## 1.5 BALANCE ENERGÉTICO EN LAS HORNILLAS PANELERAS

Los gases producto de la combustión son transportados desde la cámara de combustión y a través del ducto, cediendo parte de su calor sensible y concentrando los jugos crudos que dan origen al producto final, panela.

---

<sup>2</sup> HUGOT. E. Manual para ingenieros azucareros. 1963

<sup>3</sup> GORDILLO A., G. y GARCÍA B., H. Manual para el diseño y construcción de hornillas paneleras. R. 1992.

### 1.5.1 Calor generado en la cámara de combustión

La energía utilizada en la evaporación del agua y concentración de los jugos, proviene del bagazo producido de la molienda. La energía obtenida depende de la cantidad utilizada y de su poder calorífico, que se define como la energía interna del bagazo por unidad de masa, la cual se libera en el momento de la combustión.

Por lo tanto, el calor suministrado por el combustible está determinado por la siguiente ecuación:

$$Q_{sum} = (\dot{m}_{BS} \times VCN) / 3600 \quad [kW] \quad (2.5)$$

Donde:

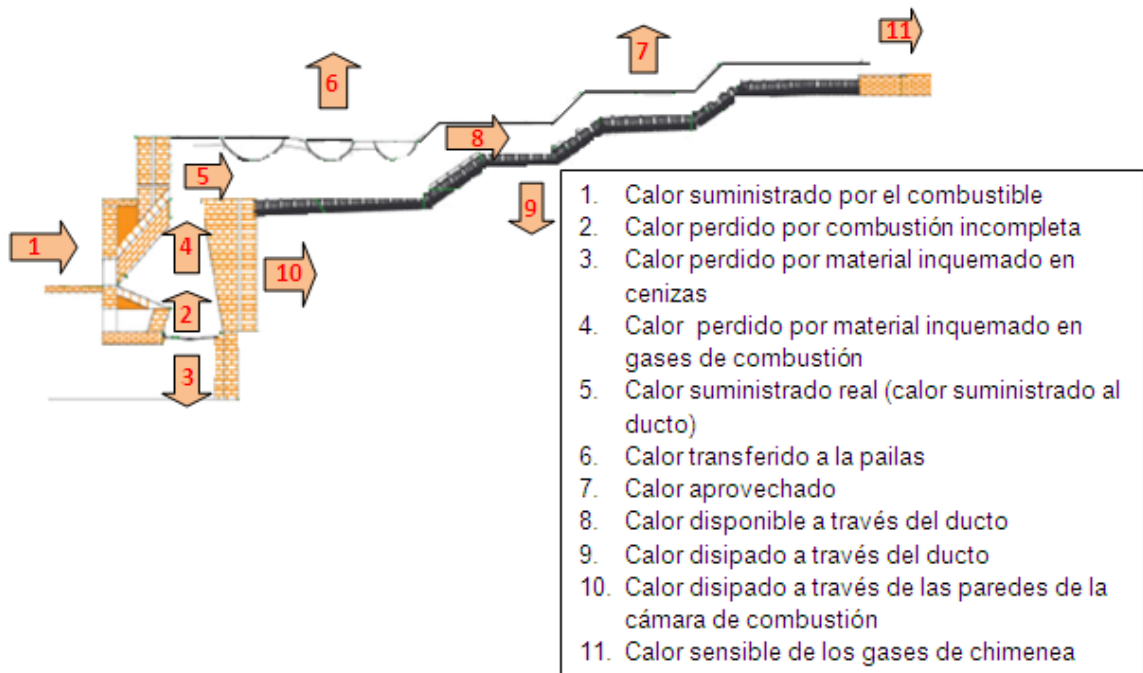
$Q_{sum}$ : Calor suministrado por el combustible, kW

$\dot{m}_{BS}$ : Flujo másico de bagazo seco, kg/h

$VCN$ : Valor Calorífico Neto, MJ/kg

La siguiente figura ilustra el balance energético del calor aprovechado y perdido en la hornilla panelera:

**Figura 4: Energía aprovechada y perdida en las hornillas Ward-CIMPA en la Hoya del río Suárez**



Fuente: Autora.

### 1.5.2 Calor perdido por combustión incompleta

La combustión del bagazo se da entre los componentes elementales del mismo y el oxígeno del aire. Para el caso del carbono del bagazo, puede ocurrir una combustión incompleta en la cual el producto final es monóxido de carbono (CO).

La energía perdida por la formación del monóxido de carbono (CO), se ve reflejada en menores temperaturas de los gases de combustión. Estas pérdidas se calculan según la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{Formación\ CO} = \frac{\text{moles}_{CO} \times (\Delta H^{\circ}_{fCO_2} - \Delta H^{\circ}_{fCO})}{3600} \text{ [kW]} \quad (2.6)$$

Donde:

$Q_{Formación\ CO}$ : Calor perdido por combustión incompleta del bagazo, kW

$\Delta H^{\circ}_{fCO_2}$ : Entalpía normal de formación de CO<sub>2</sub> (- 39350 kJ/kmol)

$\Delta H^{\circ}_{fCO}$ : Entalpía normal de formación de CO (- 110525 kJ/kmol)

$m\acute{o}les_{CO}$ : Flujo molar de CO producido, molCO/h

### 1.5.3 Calor perdido por material inquemado en cenizas

El material inquemado, se determina por diferencia de pesos de la muestra de material tomada durante el tiempo del experimento (1hora), antes y después de ser llevado a total incineración, el calor perdido por inquemados en cenizas se calcula mediante la siguiente relación matemática:

$$Q_{cenizas} = \dot{m}_{Inquemados\ cenizas} \times VCN \quad [kW] \quad (2.7)$$

$Q_{cenizas}$  : Calor perdido por material no quemado en cenizas, kW

$\dot{m}_{Inquemados\ en\ cenizas}$  Flujo másico de material no quemado en cenizas, kg/h

### 1.5.4 Calor perdido por material particulado en gases de combustión

En las cámara Ward tipo Cimpa, se emplea bagazo con humedades superiores a 45%, presentándose mayores emisiones de material particulado (MP) el cual contiene material orgánico no quemado, y este se determina por diferencia de pesos de la muestra de material tomada durante el tiempo del experimento (1 hora), antes y después de ser llevado a total incineración, el calor perdido por material particulado en gases se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{MP} = \dot{m}_{Inquemados\ en\ gases\ de\ combustión} \times VCN \quad [kW] \quad (2.8)$$

Donde:

$Q_{MP}$ : Calor perdido por material no quemado en los gases de combustión, kW

$\dot{m}_{Inquemados\ en\ gases\ de\ combustión}$ : Flujo másico de material no quemado, kg/h

### 1.5.5 Calor suministrado real

Una vez se hayan calculado las pérdidas en la cámara de combustión, es posible obtener el valor de la energía que realmente se suministra al ducto, mediante una resta de estas pérdidas de la energía que aporta el flujo total de combustible que se ha proporcionado; el calor realmente suministrado es el que va a ser utilizado en las etapas de clarificación, evaporación y concentración llevadas a cabo en el proceso y que dan origen al producto final, además de concentrar la cachaza.

El calor suministrado realmente para la concentración de los jugos se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Sum\ Real} = Q_{sum} - Q_{Cenizas} - Q_{MP} - Q_{Formación\ CO} \quad [kW] \quad (2.9)$$

$Q_{Sum\ Real}$ : Calor que se suministra realmente al ducto, kW

$Q_{sum}$ : Calor suministrado por el combustible, kW

$Q_{Cenizas}$ : Calor perdido por material no quemado en ceniza, kW

$Q_{MP}$ : Calor perdido por material no quemado en gases de combustión, kW

### 1.5.6 Calor transferido a las pailas

La energía útil es la transferida por los gases a los jugos a través de los intercambiadores (pailas) y aprovechada para el calentamiento y evaporación del agua en la obtención de la panela. La transferencia de dicha energía ocurre por la combinación de los mecanismos de conducción, convección y radiación. Mediante la convección, los gases de combustión ceden parte del calor sensible a los intercambiadores y estos lo transfieren, a su vez, por conducción a los jugos.

El calor que se transfiere a los intercambiadores o pailas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Transf\ pailas} = \sum_1^i U_i \times A_{transf} \times LMTD \quad [kW] \quad (2.10)$$

Donde:

$Q_{Transf\ pailas}$ : Calor transferido a los intercambiadores, kW

$U_i$ : Coeficiente global de transferencia de calor, depende del tipo de paila (i: el número de pailas totales en la Hornilla), kW/m<sup>2</sup>°C

$A_{Transf}$ : Área de transferencia, depende del tipo de intercambiador, m<sup>2</sup>

$LMTD$ : Temperatura media logarítmica, depende del tipo de intercambiador, °C

### 1.5.7 Calor aprovechado

El calor total aprovechado en el proceso de obtención de panela esta dado por la suma de la energía requerida en las etapas de clarificación, evaporación y concentración, además del calor necesario para la concentración de la cachaza<sup>4</sup> y se calcula según la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{aprovechado} = \dot{m}_j C p_j (T_e - T_a) + \dot{m}_{H_2O\ evap} \Delta v_{H_2O} / 3600 \quad [kW] \quad (2.11)$$

$$C p_j = 4.18(1 - 0.006 \text{ } ^\circ B_j) \quad (2.12)$$

$$\dot{m}_j = \frac{\dot{m}_p \times \text{ } ^\circ B_p}{\text{ } ^\circ B_j} \quad (2.13)$$

Donde:

$Q_{aprovechado}$ : Calor aprovechado en el proceso de elaboración de panela, kW

$\dot{m}_j, \dot{m}_p$ : Flujos máxicos de jugo y panela respectivamente, kg/h

$C p_j$ : Capacidad calorífica del jugo, kJ/kg°C

<sup>4</sup> Cachaza: Impurezas removidas manualmente de los jugos por la acción del calor y el aglutinante.

$\dot{m}_{H_2O\ evap}$ : Flujo másico de agua evaporada de los jugos, kg/h

$^{\circ}B_p, ^{\circ}B_j$ : Brix de panela y jugo respectivamente,  $^{\circ}$ Brix

$\Delta v_{H_2O}$ : Entalpía de vaporización del agua (2262), kJ/kg

### 1.5.8 Calor disponible a través del ducto

La energía presente a través del ducto corresponde al calor sensible de los gases de combustión, del cual una parte es transferida en cada una de las etapas del proceso.

La energía de la cual se dispone a través del ducto se calcula mediante la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{Disponible} = \dot{m}_g \times \overline{Cp}_g \times (T_i - T_f) \quad (2.14)$$

Donde:

$Q_{Disponible}$ : Calor total a través del ducto, kW

$\dot{m}_g$ : Flujo másico de gases de combustión, kg/h

$T_i$  y  $T_f$ : Temperatura al inicio y final del ducto,  $^{\circ}$ C

$\overline{Cp}_g$ : Capacidad calorífica promedio de gases de combustión, kJ/kmol $^{\circ}$ C, y se calcula mediante la siguiente ecuación matemática:

$$\overline{Cp}_g = \sum_1^n Y_n \times PM_n \times C_{p_n} (T) \quad (2.15)$$

Donde:

n: Número de componentes de los gases de combustión (N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>)

$Y_n$ : Fracción molar de los componentes kmol<sub>n</sub>/kmol<sub>gases</sub>

$PM_n$ : Peso molecular de los componentes kg/kmol

$C_{p_n}(T)$ : Capacidad calorífica a una temperatura específica para cada uno de los componentes  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$

La capacidad calorífica promedio de cada uno de los componentes de los gases de combustión se calcula mediante las correlaciones empíricas que son función de la temperatura y se muestran en la tabla 3:

**Tabla 3: Cálculo de la capacidad calorífica de los componentes de los gases de Combustión**

$C_{p_{\text{Gases Chimenea}}}$	$\text{kJ}/\text{kg } \Delta^\circ\text{C}$
$N_2, CO: 1.028 + 0.0000819 \times T$	$T [^\circ\text{C}]$
$CO_2: 0.832 + 0.0003428 \times T$	$T [^\circ\text{C}]$
$H_2O: 1.956 + 0.0006479 \times T$	$T [^\circ\text{C}]$
$O_2: 0.895 + 0.0000752 \times T$	$T [^\circ\text{C}]$

Fuente: GORDILLO A., G. y GARCÍA B. Corpoica-CIMPA

### 1.5.9 Calor disipado a través de las paredes del ducto

Mediante un balance energético en el ducto se determinan las pérdidas por disipación de energía a través de las paredes, como se muestra a continuación:

$$Q_{pp \text{ ducto}} = Q_{\text{Disponible}} - Q_{\text{Transf pailas}} \quad [kW] \quad (2.16)$$

Donde:

$Q_{pp \text{ ducto}}$ : Calor disipado a través del ducto,  $kW$

$Q_{\text{Disponible}}$ : Calor total disponible a través del ducto,  $kW$

$Q_{\text{Transf pailas}}$ : Calor transferido a los intercambiadores (pailas),  $kW$

### 1.5.10 Calor disipado a través de las paredes de la cámara de combustión

Una parte de la energía que suministra el combustible se pierde por combustión incompleta, por inquemados en cenizas y gases de combustión y además por las paredes de la cámara de combustión, esta energía se calcula mediante la siguiente relación matemática:

$$Q_{pp\ cámara} = Q_{Sum\ Real} - Q_{Disponible} - Q_{chimenea} \quad [kW] \quad (2.17)$$

Donde:

$Q_{pp\ cámara}$ : Calor perdido a través de las paredes de la cámara de combustión, kW

$Q_{Sum\ Real}$ : Calor suministrado real, kW

$Q_{Disponible}$ : Calor disponible en el ducto, kW

$Q_{chimenea}$ : Energía que llevan los gases de chimenea, kW

### 1.5.11 Calor perdido en chimenea

Las pérdidas en la chimenea se deben a las altas temperaturas de los gases a la salida y dependen de la humedad del bagazo utilizado y del exceso de aire en la combustión, esta pérdida energética se determina mediante la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{Chimenea} = \dot{m}_g \times \overline{Cp}_g \times (T_{ch} - T_{Ref}) \quad [kW] \quad (2.18)$$

Donde:

$\dot{m}_g$ : Flujo másico de los gases de combustión, kg/h

$\overline{Cp}_g$ : Capacidad calorífica promedio de gases de combustión, kJ/kmol°C

$T_{ch}$ : Temperatura de los gases de combustión en la chimenea, °C

$T_{Ref}$ : Temperatura de referencia (temperatura ambiente), 25°C

### 1.5.12 Eficiencia térmica del proceso

La eficiencia energética del proceso de elaboración de panela, se puede ver afectada por agentes como: combustiones incompletas, operaciones inadecuadas de la hornilla, disipaciones de energía por superficies no aisladas correctamente o con daños en sus estructuras, un inadecuado mantenimiento de la hornilla o por la ineficiente transferencia de calor en los intercambiadores (o pailas) debido a su diseño.

La eficiencia térmica global del proceso es la relación entre el calor aprovechado y el calor suministrado por el bagazo y matemáticamente se expresa así:

$$E_{ff} = \frac{Q_{Aprov}}{Q_{sum}} \times 100 \quad (2.19)$$

Donde:

$E_{ff}$ : Eficiencia del proceso, %

$Q_{Aprov}$ : Calor aprovechado en las etapas de proceso, kW

$Q_{sum}$ : Calor suministrado por el combustible, kW

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este proyecto se realizó en la Estación Experimental CIMPA de Corpoica, a 0,5°36'52" N, 78°36'24" W, con una altura de 1580 m.s.n.m., temperatura media de 22°C, precipitación media anual de 1800 mm y una humedad relativa del 75%. El trabajo tuvo dos fases, una experimental y una analítica. La primera fase comprende dos etapas: una de exploración en la cual se determinaron las variables de estudio según los protocolos diseñados por el CIMPA y mediante los mismos se establecieron los puntos de muestreo, se calibraron los equipos y se determinó la línea base de cada una de las unidades experimentales. La segunda etapa del trabajo experimental, comprende la toma de datos de campo, y toma de muestras para el laboratorio y su respectivo análisis. Para la fase de recopilación y análisis de datos, se empleó como herramienta computacional el programa Excel.

Se definió una muestra de hornillas con cámara Ward con igual potencia por unidad de volumen completamente al azar, de 5 unidades experimentales; que corresponde al mínimo número estadístico para asegurar, repetitividad y exactitud de los datos y hacer un análisis por rango y media.

Se seleccionaron cinco trapiches ubicados en la Hoya del río Suárez y diseñados por el Cimpa: Jorge Grandas (Barbosa), San Sebastián (Vélez), Santa Bárbara (Suaita), San Antonio (Güepsa) y El Arbolito (Barbosa).

## **2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Mediante un diseño de bloques aleatorizados y un diseño factorial se evaluaron los parámetros de operación (periodo de alimentación y posición válvula de chimenea), cada bloque corresponde a un trapiche diferente en los cuales se llevó a cabo un diseño experimental factorial 3X3, con posiciones de válvula de 30°, 45° y 60°, y periodos de alimentación de 90s, 150s y 210s.

Cada experimento tuvo una duración de 60min, con 30min previos de estabilización de las condiciones de operación de la hornilla. Las variables dependientes e independientes corresponden a:

VARIABLES DEPENDIENTES: material particulado en los gases de combustión [kg/h], temperatura de los gases combustión [°C], exceso de aire [%], composición de los gases [fracción molar], flujo másico de cenizas [kg/h], eficiencia térmica de la hornilla [%].

VARIABLES INDEPENDIENTES: periodo de alimentación [s], flujo de alimentación de bagazo [kg/h], área de parrilla [m<sup>2</sup>], humedad del bagazo [%], volumen de la cámara de combustión [m<sup>3</sup>], posición de la válvula en la chimenea [°].

## **2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MONTAJES**

Los equipos utilizados corresponden a: termocuplas tipo K con capacidad hasta 1200°C ubicadas a lo largo del ducto y la chimenea, conectadas a un Datalogger para toma de registros cada 30s con reporte de perfiles de temperatura a través del programa MicroScan V5, como se muestra en la figura 5, un analizador de gases Testo 350K-L controlador 3508 y un sistema recolector de material particulado que fueron ubicados en la chimenea; para la dosificación del

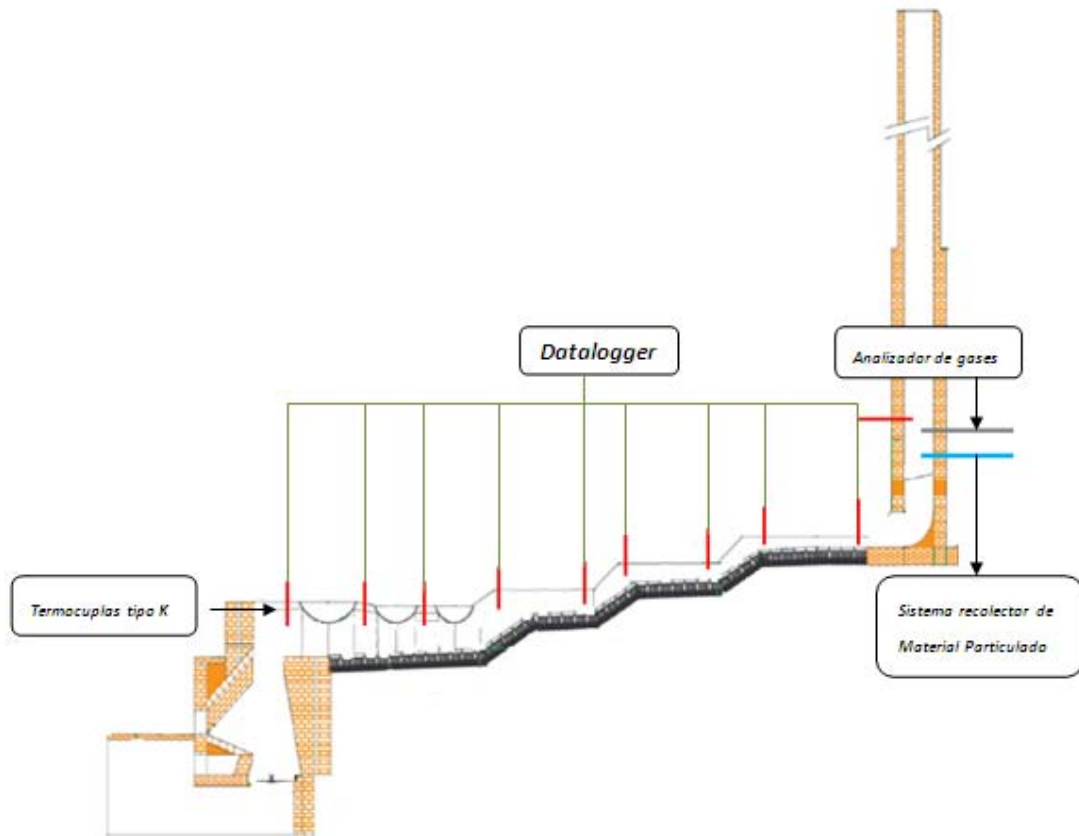
combustible, se empleó una balanza electrónica con capacidad de 200kg y para regular el tiempo de alimentación (periodo de alimentación) a la cámara se empleó un cronómetro.

El tiro se varió cambiando la posición de la válvula mariposa ubicada en la chimenea.

La cantidad de material particulado (MP) fue recolectado con un sistema diseñado para el proyecto; el cual consta de un tubo de acero inoxidable de 0,5pulg y 1m de longitud, perforado cada 1pulg con orificios de 0,5pulg y una malla de acero inoxidable de hilos trenzados de 200 orificios/pulg<sup>2</sup> que cubre la mitad del tubo perforado. El particulado obtenido después de cada experimento fue recogido y pesado en una balanza analítica, para posterior calcinación.

El MP, la temperatura y la composición puntual de los gases de chimenea, se midieron a una altura homogénea de 2,2m por encima de la base de la chimenea. Se registraron composiciones de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, y H<sub>2</sub> cada 30s durante 5min.

**Figura 5: Posición de equipos en la hornilla**



Fuente: Autora.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la evaluación de las 5 hornillas tomadas como Unidad Experimental se presentan en la Tabla 4. En esta tabla, mB corresponde a la masa de bagazo suministrado en cada una de las unidades experimentales, Pv [°] y PA [s], representan la posición de la válvula y el periodo de alimentación respectivamente.

**Tabla 4: Energía aprovechada y perdida en las hornillas evaluadas**

Hornillas	Variables			Eff térmica		Calor perdido en la hornilla									
				Calor Aprovechado		Gases Chimenea	combustión incompleta	MP Gases	Cenizas	Ducto	transferido a pailas	Paredes cámara			
	mB (kg)	Pv (°)	PA (s)	kW	%	%	%	%	%	%	%	%			
<u>1</u>	402	60	90	829,4	46,4	28,2	3,3	0,18	1,06	8,8	51,3	7,2			
			150		48,3	26,8	2,5	0,11	0,94	9,4	53,3	6,9			
			210		44,6	27,2	2,4	0,10	1,05	9,6	50,4	9,2			
		45	90		43,6	27,1	4,3	0,27	0,81	9,4	50,1	8,1			
			150		42,3	28,5	0,8	0,44	0,91	11,5	48,1	9,8			
			210		44,7	26,4	1,7	0,540	0,92	11,7	51,3	7,4			
		30	90		43,2	28,7	0,3	0,23	1,02	7,7	49,7	12,5			
			150		43,8	29,2	0,2	0,12	0,92	8,7	48,7	12,2			
			210		44,5	23,8	1,3	0,02	1,04	10,9	47,9	15,1			
		<u>2</u>	403,3		60	90	713,7	47,2	29,8	0,8	0,08	1,01	4,0	54,8	9,5
						150		47,7	28,6	0,3	0,23	0,92	4,7	55,4	9,9
						210		46,5	29,5	0,4	0,35	0,83	5,5	54,1	9,3
45	90			45,8	29,3	1,1		0,28	0,73	5,9	54,7	7,9			
	150			45,6	29,0	0,2		0,18	0,92	6,1	54,5	9,0			
	210			45,3	31,1	1,2		0,11	0,64	5,6	53,8	7,5			
30	90			46,5	28,9	5,6		0,12	0,97	5,7	53,7	4,9			
	150			46,2	29,1	3,8		0,19	0,79	5,4	52,8	7,9			
	210			45,8	29,2	3,9		0,18	0,92	4,4	53,5	7,8			

Continúa

Continuación

Hornillas	Variables			Eff térmica		Calor perdido en la hornilla						
				Calor Aprovechado		Gases Chimenea	combustión incompleta	MP Gases	Cenizas	Ducto	transferido a pailas	Paredes cámara
	mB (kg)	Pv (°)	PA (s)	kW	%	%	%	%	%	%	%	%
<u>3</u>	428,9	60	90	1201,6	47,2	28,7	2,6	0,22	1,02	7,3	50,4	9,9
			150		49,1	24,0	8,0	0,12	0,9	7,5	51,2	8,4
			210		48,5	23,0	12,4	0,23	1,03	5,9	50,1	7,4
		45	90		47,1	26,6	5,7	0,01	0,66	8,7	49,9	8,5
			150		46,5	24,9	6,5	0,05	1,06	9,2	49,7	8,5
			210		47,8	26,9	4,4	0,02	0,89	9,0	49,1	9,6
		30	90		45,4	28,9	3,0	0,12	0,77	8,2	47,2	11,9
			150		44,8	27,8	8,6	0,01	1,0	7,3	45,8	9,5
			210		45,9	24,4	7,1	0,08	0,87	5,2	49,4	13,0
<u>4</u>	427	60	90	760,7	48,2	34,0	0,9	2,63	0,72	5,2	53,3	3,2
			150		48,9	31,5	2,9	3,82	0,68	6,2	54,2	0,7
			210		47,8	32,6	1,5	2,67	0,59	4,5	53,2	4,8
		45	90		46,2	31,4	1,7	2,59	0,71	2,3	53,6	7,7
			150		45,8	30,3	3,2	3,39	0,74	2,6	53,2	6,6
			210		46,9	29,9	1,4	2,61	0,59	3,7	53,8	8,0
		30	90		47,2	31,1	1,3	3,4	0,62	2,2	54,5	6,7
			150		46,4	30,9	4,0	2,01	0,73	1,2	53,8	7,3
			210		46,9	29,8	0,3	2,39	0,75	3,2	53,2	10,3
<u>5</u>	565	60	90	841,6	45,7	29,0	0,2	0,18	0,87	6,3	53,7	9,8
			150		47,9	29,1	0,4	0,45	0,96	4,3	54,5	10,2
			210		46,2	27,0	9,8	0,94	1,09	5,2	54,2	1,8
		45	90		47,3	29,2	0,7	0,01	0,95	5,9	53,5	9,7
			150		46,8	28,4	2,9	0,01	0,96	6,3	52,8	8,5
			210		45,3	29,0	2,4	0,1	1,01	7,3	53,9	6,2
		30	90		44,8	28,9	3,0	0,22	0,99	6,6	52,2	8,0
			150		45,6	29,7	1,5	0,11	0,96	5,6	53,9	8,2
			210		46,1	28,0	5,4	0,12	0,97	6,3	52,8	6,3

Fuente: Autora.

A partir de los datos obtenidos en cuanto a energía aprovechada y perdida en cada una de las zonas térmicas de las hornillas, se analizaron las relaciones existentes entre las variables de estudio (exceso de aire, humedad del bagazo alimentado) y la eficiencia del proceso, variando las condiciones de operación

mediante los factores periodo de alimentación y posición de la válvula regulando el tiro generado por la chimenea.

### **3.1 VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA RESPECTO A LAS VARIABLES RESPUESTA**

El análisis de varianza se realizó comparando los resultados de eficiencia para la posición de válvula y los valores de eficiencia para el periodo de alimentación, con un nivel de confianza del 95%.

#### **3.1.1 Variación de la eficiencia térmica global respecto a la posición de la válvula de chimenea y periodo de alimentación**

La hipótesis a probar corresponde a: si los tratamientos tienen el mismo efecto sobre la eficiencia térmica del proceso, es así como se tienen las hipótesis nula

( $H_0$ ) e hipótesis alterna o alternativa ( $H_a$ ).

$H_0$ :  $\zeta_i = 0$  (ningún efecto principal del factor ( $P_A$  o  $P_V$ ) sobre la variable en estudio, eficiencia térmica, o interacción de los factores).

$H_a$ :  $\zeta_i \neq 0$  (No todos los tratamientos tienen el mismo efecto sobre la variable en estudio).

La hipótesis nula se rechaza si  $F_{calculada} < F_{crítico}$  y por tanto se acepta la hipótesis alternativa.

**Tabla 5: Análisis de varianza de la eficiencia térmica respecto a los factores operacionales posición de válvula (Pv) y periodo de alimentación (PA)**

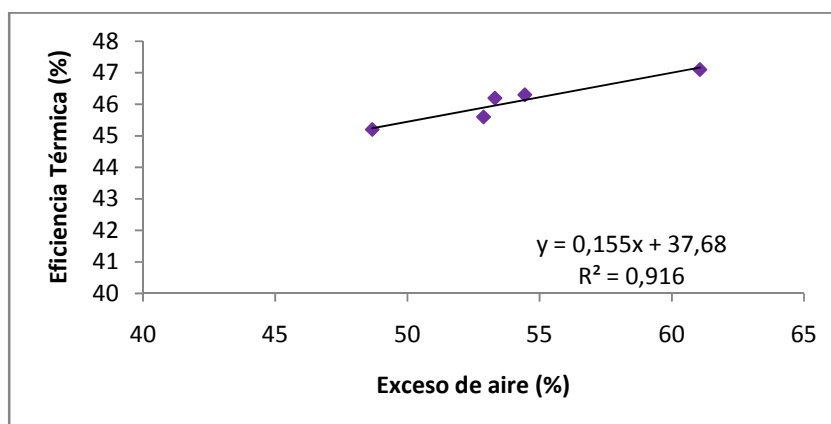
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
P <sub>v</sub>	28,63812	2	14,31906	8,59547	3,25944630
P <sub>A</sub>	0,546653	2	0,27332666	0,16407	3,25944630
Interacción	9,367186	4	2,34179666	1,40573	2,63353209
Error	59,97184	36	1,66588444		
Total	98,5238	44			

Dado que  $F_{calculada} > F_{crítico}$  para la posición de la válvula y la probabilidad es menor que  $\alpha/2=0,025\%$ , se encontró que existe un efecto de este factor sobre el valor de la eficiencia térmica del proceso.

### 3.1.2 Variación de la eficiencia térmica del proceso respecto al exceso de aire

El exceso de aire es una de las variables con mayor influencia sobre las temperaturas de los gases de combustión y la velocidad de los mismos a través del ducto, que a su vez están directamente relacionadas con el valor de la eficiencia térmica del proceso, como se muestra a continuación.

**Figura 6: Eficiencia térmica Vs exceso de aire**



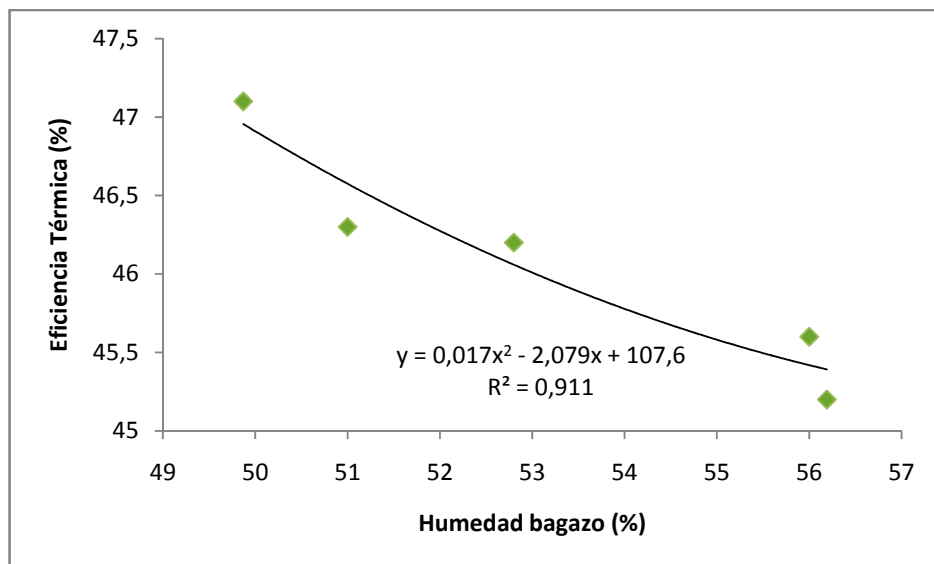
Según la figura 6, la eficiencia térmica aumenta linealmente con el exceso de aire, hasta excesos del 61%, ya que valores superiores producen descensos bruscos de la temperatura de los gases de combustión.

Con excesos entre 58 y 61%, es decir una posición de 60° regulado a través de la válvula mariposa, se minimizan las pérdidas en la cámara de combustión referentes a combustión incompleta para bagazos con altas humedades.

### 3.1.3 Variación de la eficiencia térmica del proceso respecto a la humedad del bagazo empleado

Las cámaras Ward tipo Cimpa pueden emplear bagazo con humedades superiores a 45%, si estos valores de humedad son muy elevados generan cantidades considerables de material inquemado en los gases creando capas de hollín sobre los intercambiadores y disminuyendo la eficiencia térmica del proceso.

**Figura 7. Eficiencia térmica Vs Humedad de Bagazo**



Según la figura 7, la eficiencia disminuye para valores superiores al 50%, considerándose un intervalo de 45 a 50%, óptimo para la operación de la hornilla.

### 3.2 PRUEBA DE RANGO MÚLTIPLE DUNCAN

Para determinar las diferencias que son significativas entre los valores de eficiencia obtenidos para las diferentes combinaciones de factores operacionales evaluados, se empleó la prueba de rango múltiple Duncan, y cuyo nivel de significancia es variable y depende del número de medias, si estas aumentan, la probabilidad de que se asemejen disminuye.

Según la tabla 5, que contiene los resultados del análisis de varianza de la eficiencia térmica respecto a los factores operacionales posición de válvula (Pv) y periodo de alimentación (PA), se tiene la siguiente información:

Fuentes de Variación	Suma Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Estadístico F
Tratamientos	0,546653	2	0,27332666	0,16407
Repeticiones	28,63812	2	14,31906	8,595470
Error	59,97184	36	1,66588444	
Total	98,5238	44		

Y por lo tanto el error estándar de la media será:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{CME}{r}}$$

$$S_{\bar{x}} = 0.577$$

Para obtener los comparadores Duncan, se toman de la tabla de Duncan los valores de acuerdo al número de tratamientos y con los grados de libertad del error. Cada uno de estos valores será multiplicado por el error estándar de la

media y éstos serán los comparadores para determinar cuales diferencias son significativas.

**Tabla 6: Comparadores Duncan**

De la tabla de Duncan para 36 grados de libertad	Producto del error estándar de la media por el valor tabular
2,87	1,66
3,01	1,74
3,11	1,80
3,18	1,84
3,23	1,87
3,28	1,89
3,31	1,91
3,34	1,93

Para identificar los tratamientos o experimentos conformados por la combinación de los factores operacionales posición de válvula (Pv) y periodo de alimentación (PA), se empleó la notación mostrada a continuación en la tabla 7:

**Tabla 7: Combinación de variables**

P <sub>v</sub> /P <sub>A</sub>	90s	150s	210s
60°	A	B	C
45°	D	E	F
30°	G	H	I

La comparación de las diferencias se hace en forma diagonal, es decir que para el caso, el comparador 1,80 sirve para comparar las diferencias 1,3; 1,5 y 3,0.

Según el nivel de significancia, se marcan con un asterisco las diferencias que resultan significativas (al 5% de probabilidad) y con dos asteriscos las que sean altamente significativas (al 1% de probabilidad).

**Tabla 8: Tabla de diferencias entre medias**

	B	A	C	D	F	I	E	G	H	Comparador Duncan
B	0	1,5	1,7	2,4	2,4	2,6	3,0*	3,0*	3,0*	
A		0	0,2	0,9	0,9	1,1	1,5	1,5	1,5	1,66
C			0	0,7	0,7	0,9	1,3	1,3	1,3	1,74
D				0	0	0,2	0,6	0,6	0,6	1,80
F					0	0,2	0,6	0,6	0,6	1,84
I						0	0,4	0,4	0,4	1,87
E							0	0	0	1,89
G								0	0	1,91
H									0	1,93

Según la tabla 8, las diferencias son significativas al 5%, para posiciones de válvula de chimenea de 60°.

### 3.3 VARIACIÓN EN EL CALOR PERDIDO EN LA HORNILLA RESPECTO A LA POSICIÓN DE LA VÁLVULA Y EL PERIODO DE ALIMENTACIÓN

Mediante un análisis de varianza, se comparó los valores de cada una de las pérdidas calculadas en las hornillas evaluadas, respecto a los factores de operación posición de válvula (Pv) y periodo de alimentación (PA), con un nivel de confianza del 95% y se obtuvo:

#### 3.3.1 Energía de los gases de chimenea

A continuación se muestra el resumen del análisis de varianza de los factores operacionales evaluados sobre el valor de la energía que se pierde con los gases de combustión liberados al medio ambiente.

**Tabla 9: Análisis de varianza de la energía perdida por los gases de chimenea respecto a la posición de la válvula (Pv) y el periodo de alimentación (PA)**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	0,02155111	2	0,0107755	0,0020304	3,2594463
P <sub>A</sub>	16,0766177	2	8,0383088	1,5146691	3,2594463
Interacción	15,3028888	4	3,82572222	0,7208858	2,6335320
Error	191,05104	36	5,30697333		
Total	222,452097	44			

Según la información que presenta la tabla 5 se rechaza la hipótesis de la existencia de efectos principales de las variables posición de la válvula y periodo de alimentación respecto al valor del calor sensible de los gases de combustión liberados al medio ambiente, ya que  $F_{calculada} > F_{critico}$  y la probabilidad es mayor a 0,025%.

### 3.3.2 Calor perdido por formación de monóxido de carbono (CO)

El análisis de los efectos de los factores operacionales sobre el valor de la energía perdida por formación de monóxido de carbono se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 10: Análisis de varianza del calor perdido por combustión incompleta respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	4,8454896	2	2,4227448	0,289173	3,25944630
P <sub>A</sub>	15,143272	2	7,571636467	0,903733	3,25944630
Interacción	25,357109	4	6,339277467	0,756641	2,63353209
Error	301,61435	36	8,3781764		
Total	346,96022	44			

De acuerdo con la información presentada en la tabla 10 y dado que  $F_{calculada} > F_{critico}$  se rechaza la hipótesis nula que indica ningún efecto principal del factor (PA o Pv)

sobre la variable en estudio, eficiencia térmica, o interacción de los factores, para un nivel de significancia del 95%.

### 3.3.3 Calor perdido por material no quemado en gases de combustión

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los cocientes mediante los cuales se evalúan las variaciones sobre el valor de la energía perdida por material no quemado en gases de combustión, debido a efectos principales o de interacción de los factores de operación evaluados.

**Tabla 11: Análisis de varianza del calor perdido por material no quemado en gases de combustión respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	0,29987111	2	0,1499355	0,1011456	3,25944630
P <sub>A</sub>	0,02455111	2	0,0122755	0,00828101	3,25944630
Interacción	0,58576888	4	0,1464422	0,09878902	2,63353209
Error	53,36544	36	1,4823733		
Total	54,2756311	44			

Dado que  $F_{calculada} > F_{critico}$ , no existe ningún efecto de los factores evaluados sobre el valor de estas pérdidas, como se observa en la tabla 11.

### 3.3.4 Calor perdido por material no quemado en cenizas

A continuación se presenta el resumen del análisis de varianza, para determinar la existencia de efectos principales de los factores de operación evaluados (posición de válvula y periodo de alimentación) en los resultados de la energía perdida por material no quemado en cenizas, este análisis se realizó para un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 12: Análisis de varianza del calor perdido por material no quemado en cenizas respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	0,04808444	2	0,0240422	1,12891949	3,25944630
P <sub>A</sub>	0,00775111	2	0,0038755	0,18197944	3,25944630
Interacción	0,06151555	4	0,0153788	0,72212657	2,63353209
Error	0,76668	36	0,0212966		
Total	0,88403111	44			

Según la tabla 12, no existen efectos principales de los factores evaluados en los resultados de estas pérdidas, por lo tanto,  $F_{calculada} > F_{crítico}$ .

### 3.3.5 Calor disipado a través del ducto

Otras pérdidas energéticas evaluadas son las generadas por la disipación del calor a través del ducto, de la misma manera se realizó un análisis de varianza para determinar los efectos de los factores operacionales considerados, posición de válvula de chimenea y periodo de alimentación de bagazo en los resultados obtenidos, el análisis se realizó para un nivel de confianza de 95%.

**Tabla 13: Análisis de varianza del calor perdido por disipación de energía a través del ducto respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	9,31681333	2	4,6584066	0,66865033	3,2594463
P <sub>A</sub>	0,47881333	2	0,2394066	0,03436354	3,2594463
Interacción	3,00629333	4	0,7515733	0,10787803	2,6335320
Error	250,80768	36	6,96688		
Total	263,6096	44			

Como se observa en la tabla resumen (tabla 13), no existen efectos principales de estos factores en los valores de energía perdida a través del ducto, por lo tanto

$$F_{\text{calculada}} > F_{\text{crítico}}$$

### 3.3.6 Calor perdido a través de las paredes de la cámara

Por último, se presenta el resumen del análisis de varianza para determinar los efectos de los factores posición de válvula y periodo de alimentación en los valores de energía perdida por disipación de calor a través de las paredes de la cámara de combustión.

**Tabla 14: Análisis de varianza del calor perdido a través de las paredes de la cámara de combustión respecto a la posición de la válvula y el periodo de alimentación**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
P <sub>v</sub>	37,261126	2	18,6305634	2,60834233	3,25944630
P <sub>A</sub>	0,1286443	2	0,06432246	0,00900536	3,25944630
Interacción	15,141768	4	3,78544213	0,5299747	2,63353209
Error	257,13660	36	7,1426834		
Total	309,66814	44			

De acuerdo con las tablas 9 a 14, para un nivel de confianza del 95% se obtuvo en todos los casos que  $F_{\text{calculada}} < F_{\text{crítico}}$ , por lo tanto, no existen efectos principales de los factores operacionales evaluados, en los valores de las pérdidas calculadas en la hornilla, siendo significativa la posición de la válvula en los valores de la eficiencia térmica del proceso.

## 4 CONCLUSIONES

Se encontró que las pérdidas de calor en las actuales hornillas Ward-CIMPA son en promedio de: 29% el calor que acompaña a los gases de combustión, 7% el calor que se disipa a través de las paredes, pisos y arcos del ducto, 3% el calor que se pierde por formación de CO, 6% el calor disipado a través de las paredes de la cámara de combustión y por último 1% y 0,96% el calor perdido por el material que queda sin quemar en cenizas y aquel que es arrastrado junto con los gases (material particulado) respectivamente.

El factor operacional que influye directamente en el valor de la eficiencia térmica del proceso corresponde a la posición de la válvula de chimenea, con variaciones significativas sobre esta variable con posiciones de 60°.

La humedad del bagazo alimentado y el exceso de aire, empleados durante la operación de la hornilla, influyen directamente en los resultados de la eficiencia térmica del proceso. Humedades de bagazo entre 45 y 53 % y excesos de aire entre 58 y 61%, favorecen la combustión y por ende la temperatura de los gases, así como la velocidad a través del ducto, mejorando la transferencia de calor.

El valor de la posición de válvula que causa mayor variabilidad en los resultados de la eficiencia térmica, corresponde a 60°. Si la hornilla es operada con combinaciones 60° de posición de válvula y 150s de periodo de alimentación registra los valores más altos de eficiencia térmica del proceso, para bagazos con humedades cercanas a 50%.

## 5 RECOMENDACIONES

Emplear periodos de alimentación de 150s puesto que suministran el tiempo necesario para evitar grandes esfuerzos en los operarios y combustiones eficientes que eviten sobrecargas de bagazo en la cámara de combustión y descensos de temperatura bruscos.

Operar la hornilla con bagazos cuya humedad promedio se encuentre cercana a 45 ó 50%, lo cual se consigue con mezclas entre bagazos húmedos obtenidos de la molienda y bagazos que se tiene almacenados de moliendas anteriores, obteniendo así menores perdidas en la cámara de combustión y mayores energías para ser suministradas a la zona de transferencia de calor, además se reduce la generación de material particulado que es arrastrado por los gases y que forma capas de hollín sobre los intercambiadores reduciendo la transferencia del calor, la producción y la calidad de la panela.

Ajustar la posición de la válvula a valores menores a 60° y periodos de alimentación mayores a 150s, si se trabaja con bagazos cuya humedad sea superior a 52% (58% de extracción del molino), ya que para bagazos muy húmedos es necesario periodos de alimentación más largos evitando descensos de temperatura bruscos, o con bagazos muy secos los periodos de alimentación se hacen más cortos, de la misma manera el porcentaje de exceso aire para la combustión se hace menor cuando la humedad de bagazo es menor a 50%.

Regular el exceso de aire para la combustión con la válvula de la chimenea y evitar la entra de aire por la boca de alimentación de la cámara, tapando con el bagazo que se va suministrando periódicamente

## BIBLIOGRAFÍA

- BENITEZ PEREA, 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. Barbosa, 2001.
- GARCIA B Hugo R. – ALBARRACIN C. Luis C. – TOSCANO LATORRE, Adriana. –SANTANA M. Natalia J. –INSUASTY B. Orlando. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. Tibaitatá. 2007
- GARCIA BERNAL, Hugo; CASTILLO MONROY, Edgar. Desarrollo de una herramienta digital para el diseño riguroso de hornillas paneleras de bajo impacto ambiental. 2004.
- GORDILLO A., G. y GARCÍA B., H. Manual para el diseño y construcción de hornillas paneleras. R. 1992.
- HERNANDEZ AGUDELO, Leonel Armando. Determinación de los parámetros de desempeño para la combustión del bagazo en las hornillas paneleras con cámaras Ward-Cimpa. 1999.
- HERNANDEZ RESTREPO, Rosember. Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para las pailas aleteadas, redonda, plana, pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la industria panelera. 2004.

- HOLMAN, J. P., Transferencia de calor. Compañía Editorial Continental S.A., México, 1995.
- HUGOT, E. Manual para Ingenieros Azucareros. Segunda Edición. Editorial Continental. México. 1982.
- INCROPERA, Frank P.- De WITT, David P. Fundamentos de Transferencia de Calor.
- MONTOYA, Luis Hernando. Estudio hidrotérmico para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor en tres tipos de pailas para hornillas paneleras. 1997.
- MOSQUERA, Silvio Andrés; CARRERA, Jorge Eliécer y VILLADA, Héctor Samuel. Variables que Afectan la Calidad de la Panela Procesada en el departamento del Cauca. 2007.
- OSORIO CADAVID, Guillermo. Desarrollo Y Fortalecimiento de la Producción de Miel en Trapiches Paneleros para el uso en Ganadería Bovina en el Municipio de Sonsón Antioquia.
- OSORIO CADAVID, Guillermo. Manual Técnico Buenas Prácticas Agrícolas – BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura –BPM- en la Producción de Caña y Panela. Medellín, Colombia. 2007.
- REYES ACOSTA, Jeisson Leonardo. Eficiencia Energética del Sistema de Producción, “Caña Panelera” en el Municipio del Valle de San José, Departamento de Santander, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 2003.

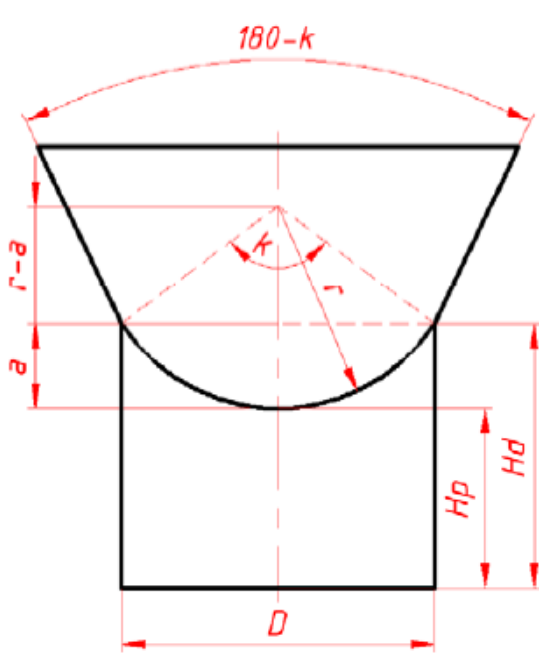
- RODRIGUEZ B, Gonzalo y GOTTRET, María Verónica. Adopción e Impacto de la Tecnología de panela en la Hoya del Río Suárez y Cundinamarca (Colombia), Informe Técnico.
- SOLER VILLAMIZAR, Juan Pablo y GOMEZ TOVAR, Franco Hernán. Determinación de los Parámetros de Diseño y Operación de Cámaras de Combustión tipo Ward-Cimpa y Plana-Cimpa en Hornillas Paneleras. 2004.
- VELÁSQUEZ, Héctor I., JANNA, Farid C y AGUDELO, Andrés F. Diagnostico Exergético de los Procesos Productivos de la Panela en Colombia. Revista Energética 35, Artículo de Investigación. Universidad Nacional de Colombia. 2006.
- VELÁSQUEZ ARREDONDO, Héctor Iván; AGUDELO SANTAMARÍA, Andrés Felipe y ÁLVAREZ GONZÁLEZ, Jorge Iván. Mejorando la Producción de Panela en Colombia. LEISA, Revista de Agroecología. Junio. 2005

# **ANEXOS**



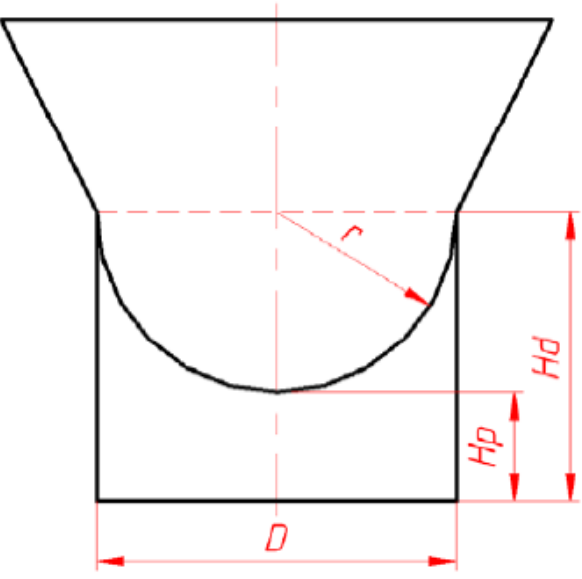
**ANEXO B<sup>5</sup>: ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA CADA TIPO DE  
PAILA EMPLEADA EN LA INDUSTRIA PANELERA**

**PAILA SEMIESFÉRICA**

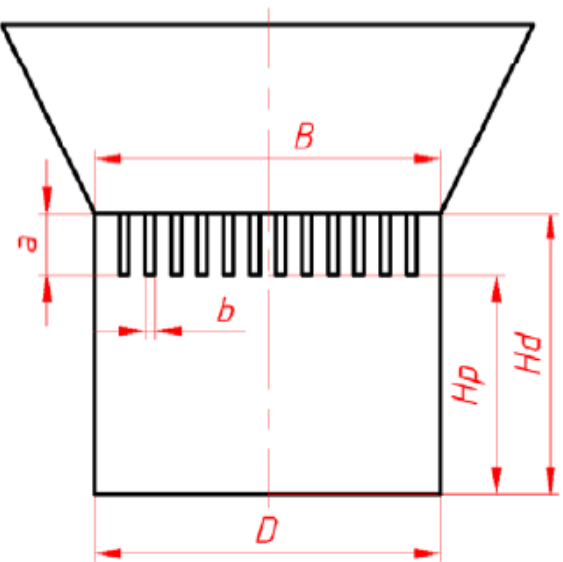
Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha/2)]$
	<b>Área transversal del ducto</b>
	$A_t = H_c D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - \frac{D(r-a)}{2} \right]$
	$A_t = H_c D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - r^2 \sin(\alpha/2) \cos(\alpha/2) \right]$
	donde, $D = 2r \sin(\alpha/2)$ ; $a = r [1 - \cos(\alpha/2)]$
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b>
	$V_j = \frac{\pi r^3}{2} [1 - \cos(\alpha/2)]$
	<b>Diámetro hidráulico</b>
	$D_h = \frac{4A_{\text{Transversal}}}{\text{Perimetro}} = 4R_h$ $D_h = \frac{4 \left\{ H_c D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - r^2 \sin(\alpha/2) \cos(\alpha/2) \right] \right\}}{D + 2H_c + r\alpha}$

<sup>5</sup> Hernández Restrepo, Rosember. Determinación dinámica de los coeficientes de transferencia de calor para las pailas aleteada, redonda, plana, pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la industria panelera. 2004

## PAILA SEMICILÍNDRICA

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = \pi r^2 + \pi r M$ <p>donde, M=Largo de la paila</p>
	<b>Área transversal del ducto</b> $A_t = H_d D - \frac{\pi r^2}{2}$
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b> $V_j = \frac{\pi r^2 M}{2}$
	<b>Diámetro Hidráulico</b> $D_h = \frac{4A_{\text{Transversal}}}{\text{Per. mojado}} = 4R_h$
	$D_h = \frac{4 \left( H_d D - \frac{\pi r^2}{2} \right)}{D + 2H_d + \pi r}$

## PAILA PLANA ALETEADA

Esquema general	Area de transferencia de calor
	$A_o = BM + 2na(M + b)$
	<p>donde,  <math>n</math> = Numero de aletas</p>
	<p><b>Area transversal del ducto</b></p>
	$A_t = H_d D - nab$
<p><b>Diámetro Hidráulico</b></p>	$D_h = \frac{4A_{Transversal}}{Per.mojado} = 4R_h$
$D_h = \frac{4(H_d D - nab)}{D + 2H_d + B + 2na}$	

## PAILA PIROTUBULAR

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = M \left\{ 2a + b + n \left[ c + d + e + \sqrt{(c-d)^2 + e^2} \right] + 2 \left[ ab - \frac{ne(c+d)}{2} \right] \right\}$ <p>donde, <math>n</math> = Número de canales</p>
	<b>Área transversal del ducto</b>
	$A_t = H_o D - ab + \frac{ne(c+d)}{2}$
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b>
	$V_j = \left[ ab - \frac{ne(c+d)}{2} \right] M$
<b>Diámetro Hidráulico</b>	
$D_h = \frac{4A_{Transversal}}{Per.mojado} = 4R_h$	
$D_h = \frac{H_o D - ab + \frac{ne(c+d)}{2}}{2(D + H_o + a) + n \left[ c + d + e + \sqrt{(c-d)^2 + e^2} \right]}$	

**ANEXO C: MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS EN EL DESARROLLO  
EXPERIMENTAL**

Equipos y Materiales			
Cantidad	Descripción del equipo	Cantidad	Descripción de los Materiales
9	Termocuplas Testo tipo K para gases (70 cm)	3	Lonas (2m) con argollas para pesar Bagazo
3	Termocuplas Testo tipo K para gases (1,5m- 2m)	1	Gafas de seguridad
2	Termómetro digital Testo 735 con dos entradas	1	Par de guantes de cuero
1	Cronometro	50	Bolsas Ziploc de 1kg (recolección de muestras de Bagazo)
1	Sistema Recolector de Material Particulado	50	Bolsas Ziploc de 5kg (recolección de muestras de ceniza)
1	Datalogger de 16 entradas	5	Tapaboca
2	Balanza electrónica Kern HCB 200K 100 (capacidad 200 kg)	2	Trinche
1	Balanza analítica Mettler, modelo AE240, 110-220V, (240g de capacidad)	1	Flexómetro 7,5m
1	Horno-estufa Memmert, modelo 30, 220V, Tmax 200 °C	1	Lamina para recolectar la ceniza
2	Termocuplas Testo tipo K para jugos	1	Resma de papel
1	Analizador de gases Testo 350K-L controlador 3508	1	Botiquín de primeros auxilios
1	Computador Portátil DELL Inspiron		

## ANEXO D: SISTEMA RECOLECTOR DE MATERIAL PARTICULADO

Para determinar la cantidad de material inquemado que es arrastrado por los gases de combustión, se diseñó con la colaboración del personal de la E.E CIMPA un sistema recolector, el cual se muestra a continuación:

