

XIX. HORNILLAS PANELERAS

* Gilberto Sandoval Sandoval

1. GENERALIDADES

El *horno* usado en la elaboración de la panela, generalmente llamado hornilla panelera, es el implemento del trapiche encargado de transformar la energía del bagazo en energía calórica, para evaporar el agua contenida por los jugos extraídos de la caña hasta lograr el producto final panela (Figura 1).

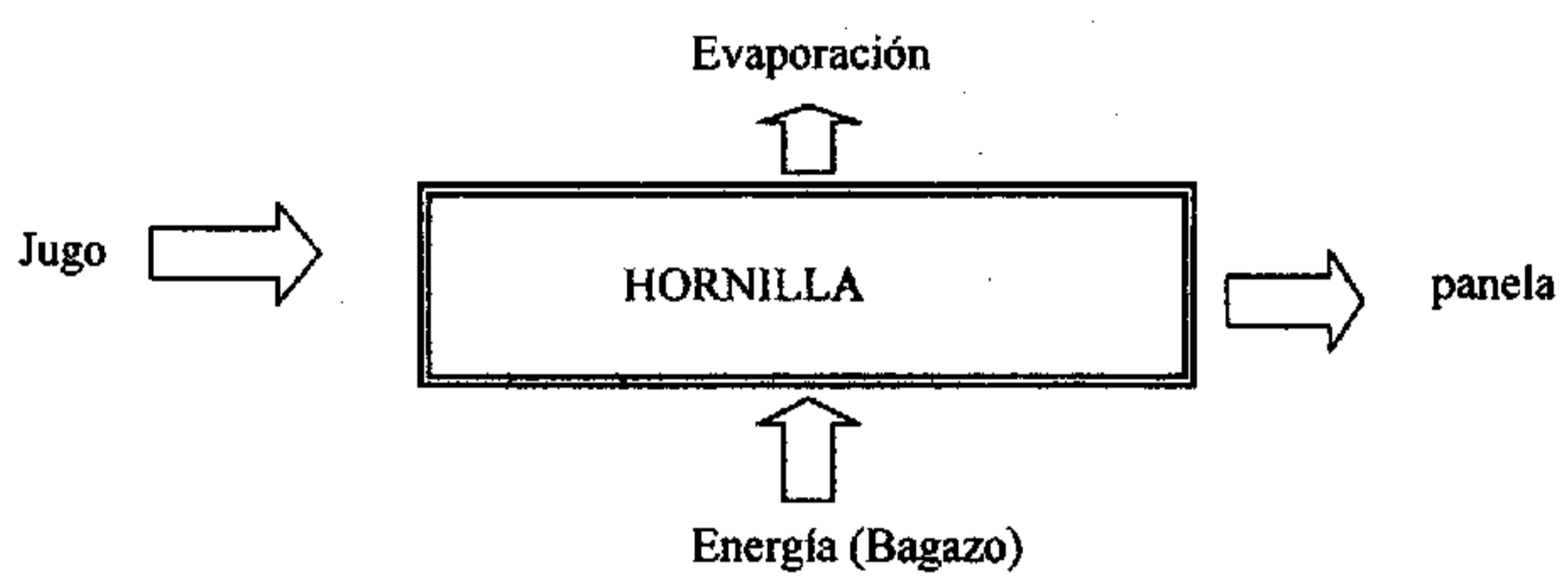


FIGURA 1. Hornilla panelera

La evaporación es *abierta* porque se realiza en vasijas (pailas) expuestas a la presión atmosférica y el calentamiento es a *fuego directo* porque las pailas se exponen directamente a los gases de la combustión.

2. PARTES PRINCIPALES DE UNA HORNILLA PANELERA

En la Figura 2, se observan las partes que componen una hornilla: Cámara de combustión, ducto de humos, pailas y chimenea.

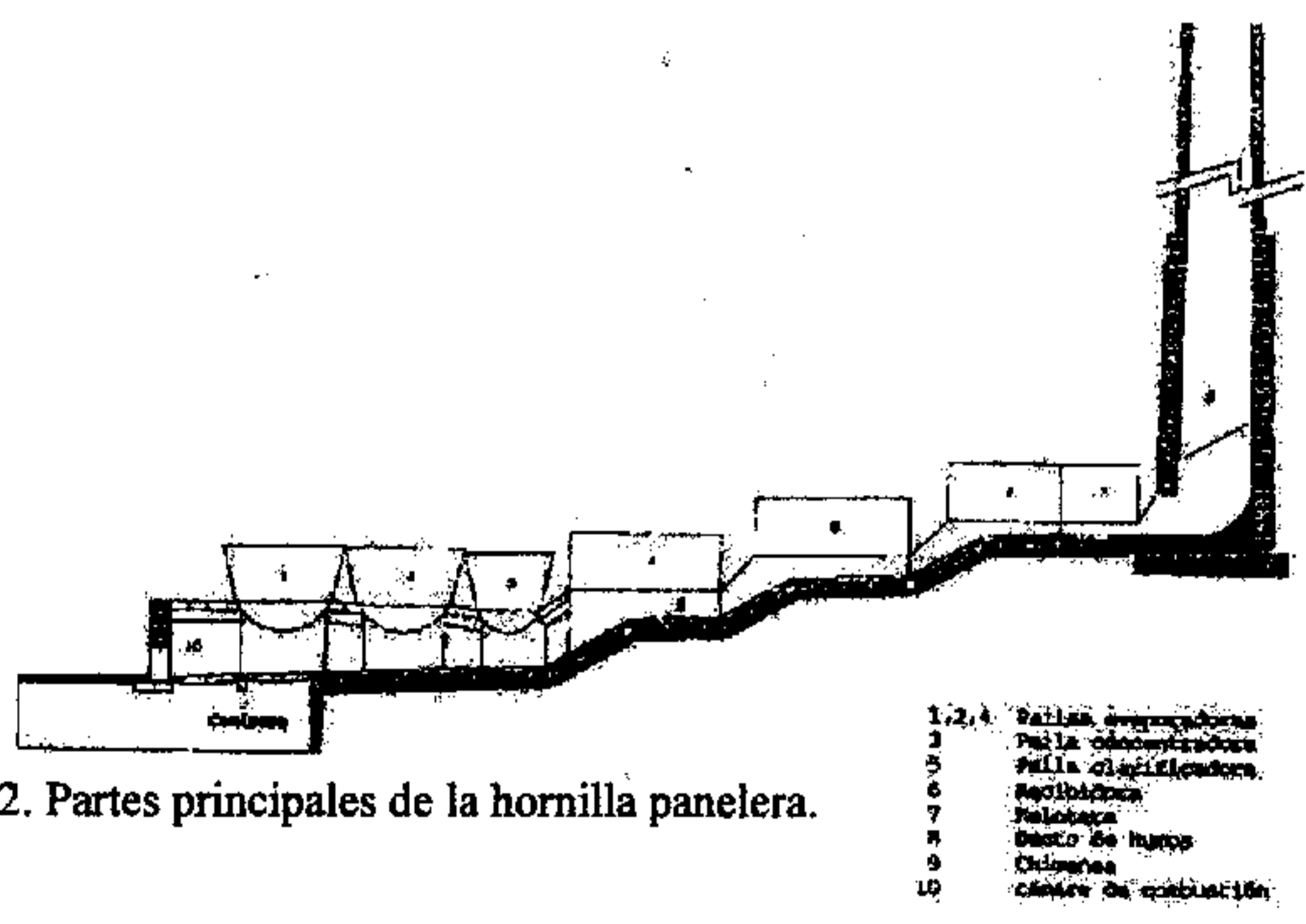


Figura 2. Partes principales de la hornilla panelera.

CÁMARA DE COMBUSTION

Es un espacio confinado que se encuentra ubicado en la parte anterior de la hornilla, donde se realiza la combustión del bagazo, consta de: cenicero, puerta de alimentación y parrilla (Figura 3).

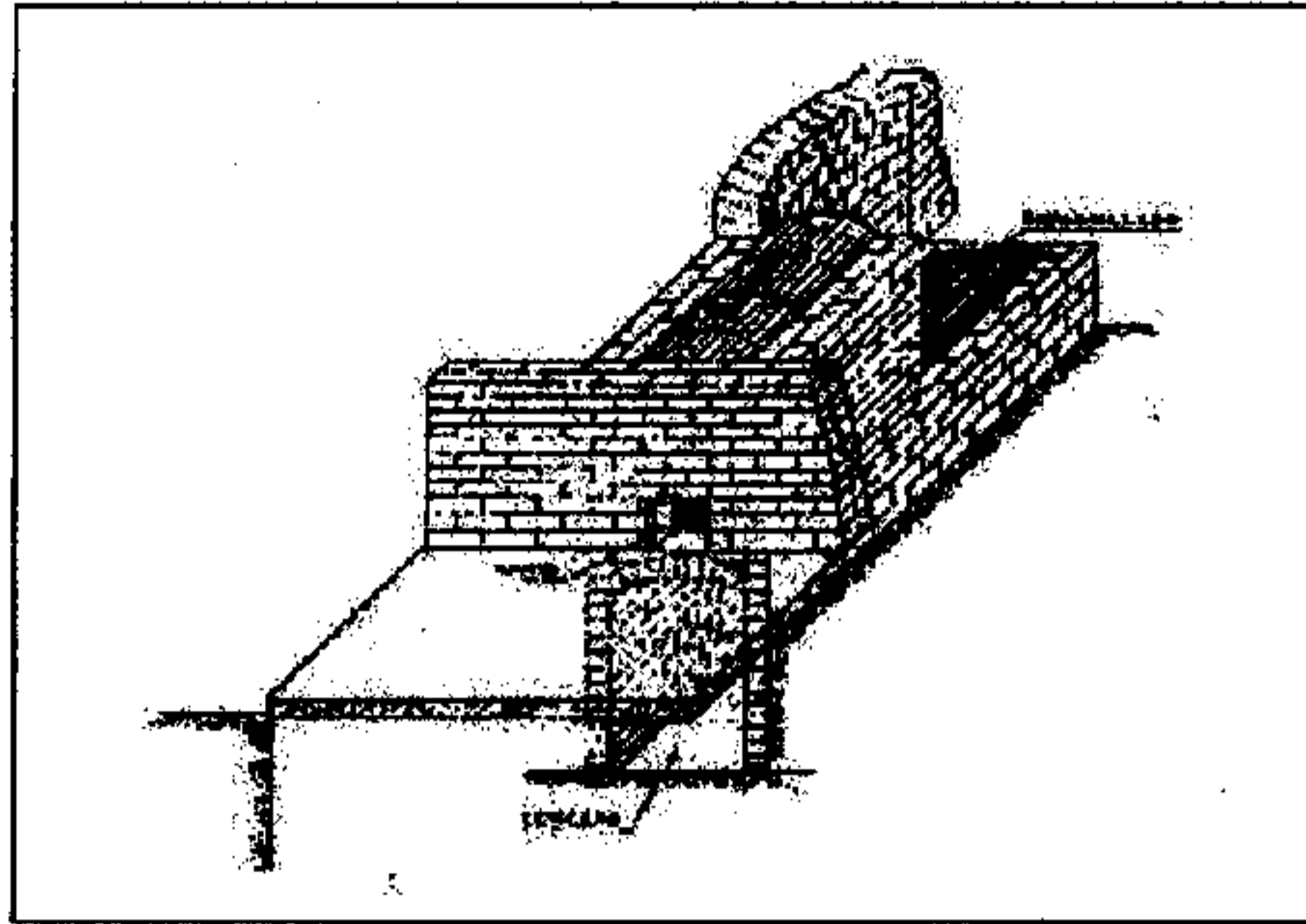


FIGURA 3. Cámara de combustión.

El cenicero es un compartimiento ubicado directamente debajo de la parrilla. Sus funciones son almacenar las cenizas que se producen al quemar el bagazo y canalizar y precalentar el aire necesario para la combustión (Figura 3).

La puerta es la abertura por donde el hornero introduce el bagazo. En realidad es una boca de alimentación pues no posee, en la mayor parte de los casos, una hoja que se pueda abrir o cerrar. Se construye generalmente en fundición de hierro gris, el cual soporta temperaturas medianamente altas sin deformarse (Figura 4).

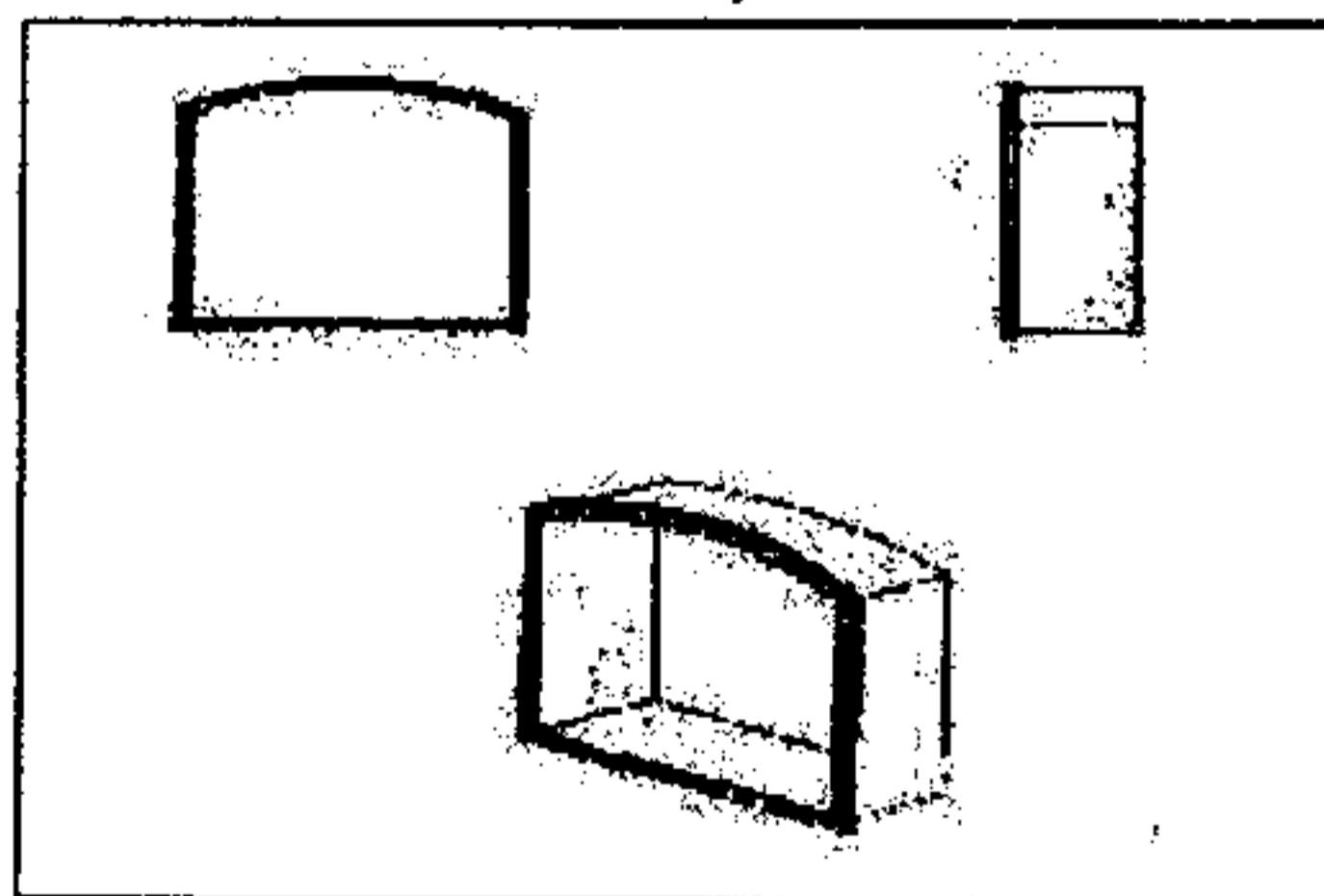


FIGURA 4. Puerta de hornilla en fundición gris.

La parrilla es una especie de enrejado que sirve de lecho para el bagazo, permite la entrada del aire para la combustión y el paso de las cenizas hacia el cenicero. Se fabrica generalmente en fundición de hierro gris, en diferentes tamaños y formas (Figura 5).

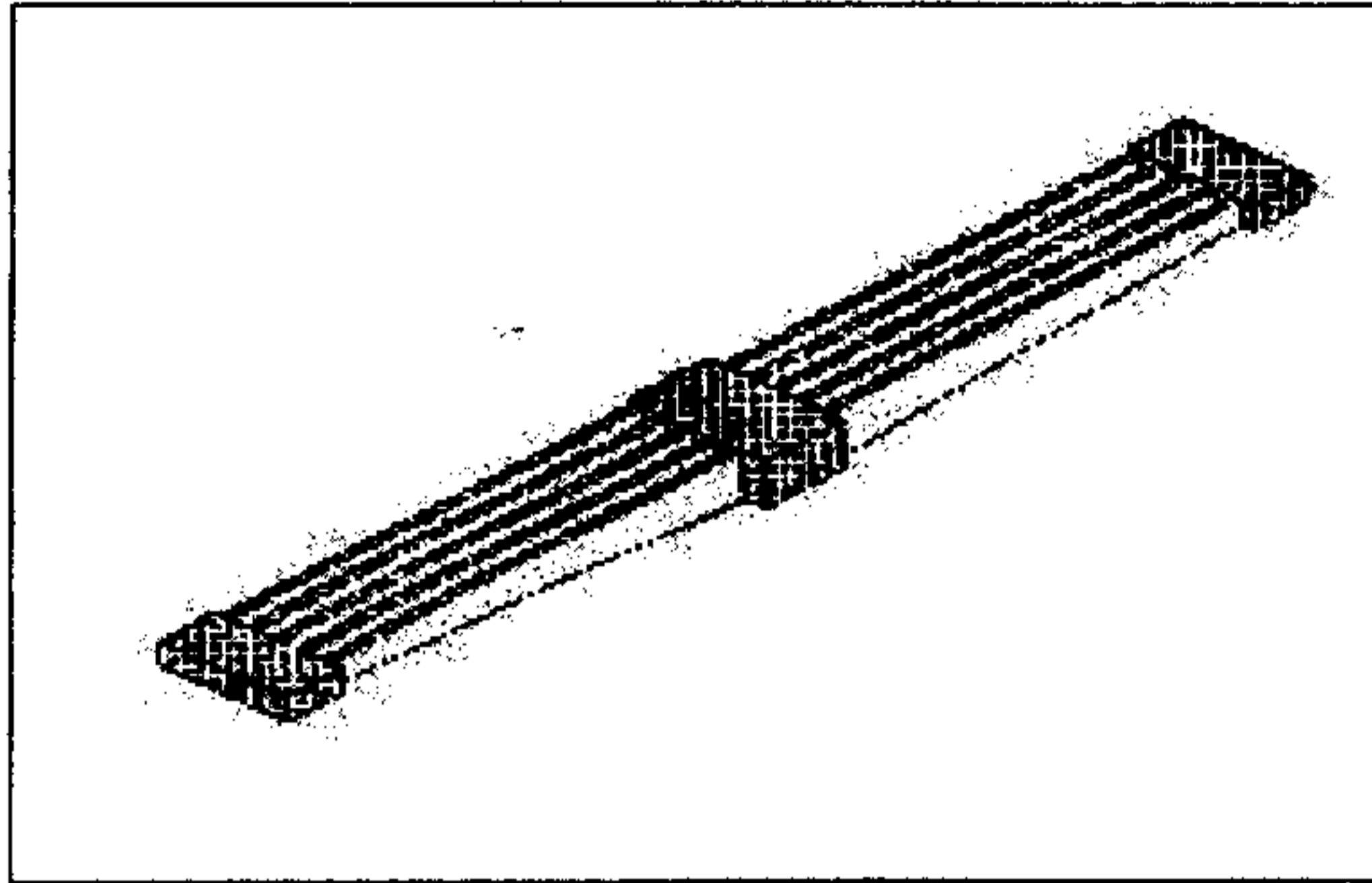


FIGURA 5. Parrilla en fundición gris.

DUCTO DE HUMOS

También recibe el nombre de *conducto de gases, camino y buque*, entre otros. Las partes que constituyen el ducto son las paredes y muros de soporte, piso, arcos y pailas. Su función es guiar los gases de la combustión y ponerlos en contacto con las pailas para transferir parte de su energía a los jugos.

Los ductos varían de acuerdo a su forma y materiales en que se construyen, evolucionando desde los más tradicionales que son una excavación realizada directamente en el sitio de construcción de la hornilla y donde las pailas se colocan soportadas por muros y arcos de adobe, hasta aquellas donde las paredes, pisos, arcos y muros se construyen en ladrillo refractario (Figura 6).

Las pailas son vasijas o recipientes metálicos (en algunas partes llamadas *fondos*) donde se depositan los jugos, para la evaporación del agua, durante el proceso de elaboración de la panela. El calor producido por la combustión del bagazo y transportado por los gases, se transfiere a los jugos a través de las pailas. Estas se fabrican generalmente en: cobre, aluminio o hierro, por procesos de fundición o deformado en caliente.

Existen pailas de forma semiesférica, semicilíndrica, trapezoidales, planas y planas aleteadas (Figura 7). El tamaño y la forma varían de acuerdo con las costumbres regionales y con la capacidad de la hornilla principalmente.

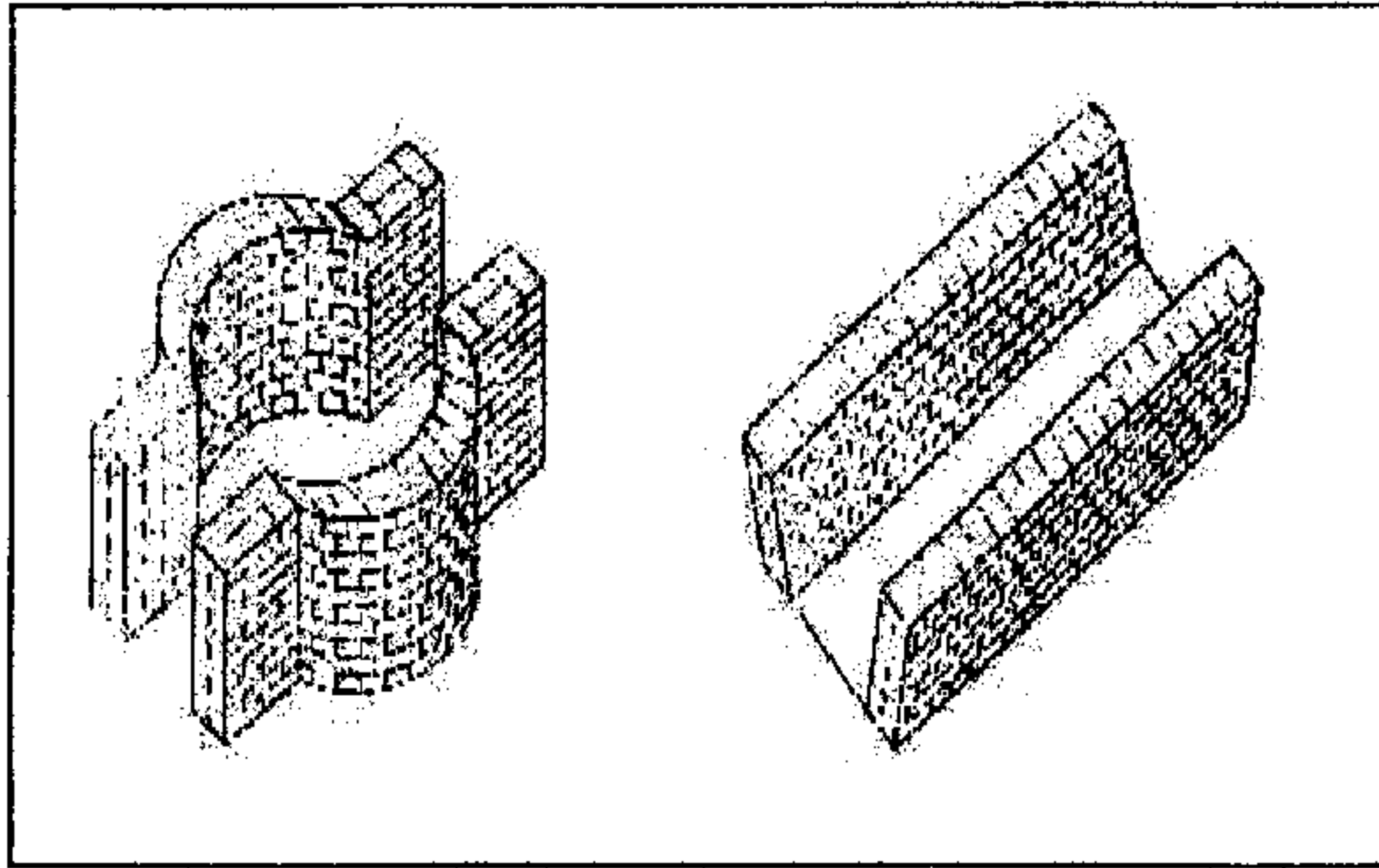


FIGURA 6. Ductos típicos para pailas semiesféricas y planas.

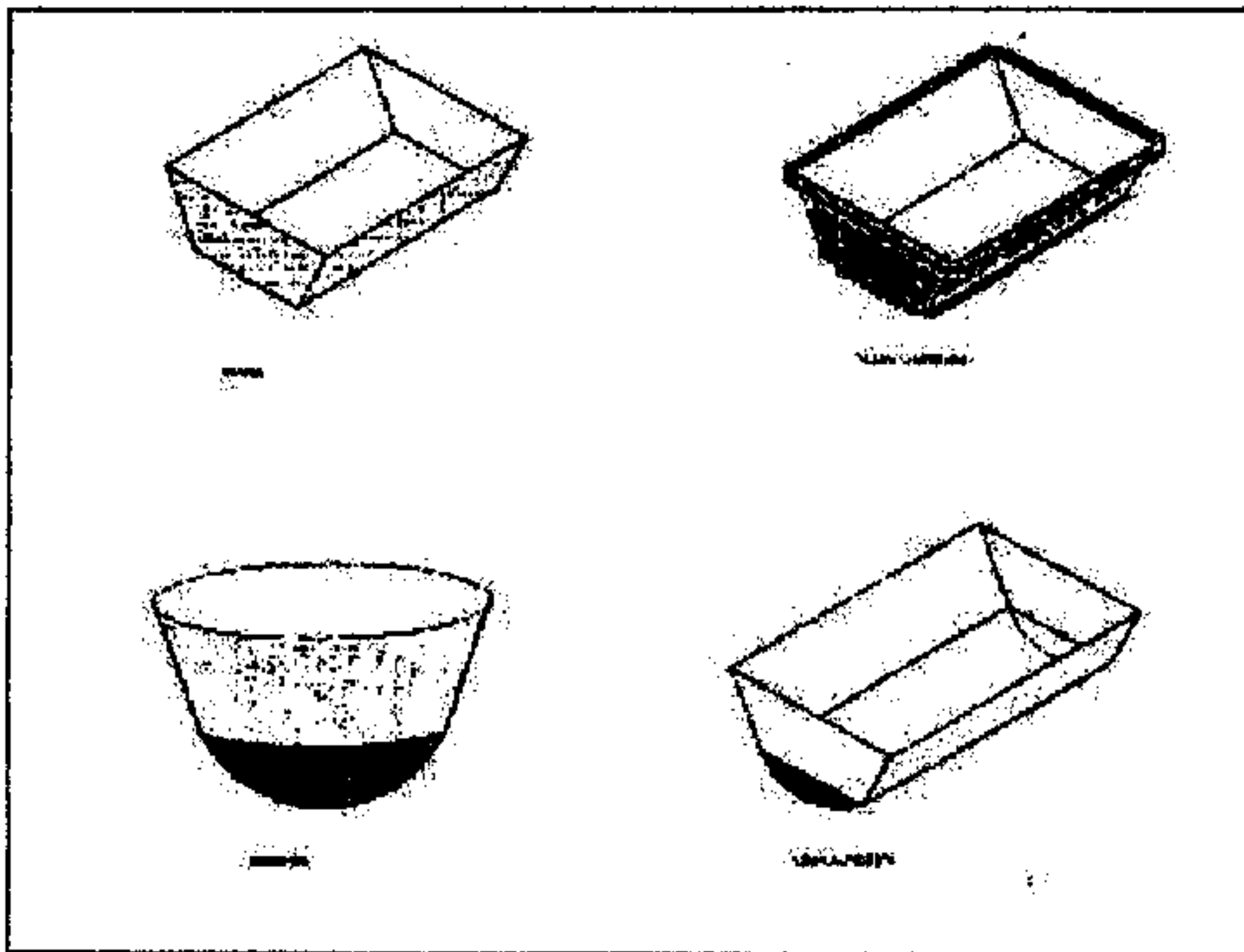


FIGURA 7. Tipos de pailas utilizadas en la industria panelera.

CHIMENEA

Es un conducto construido en ladrillo o en lámina de hierro, ubicado al final de la hornilla y empalmado directamente con el ducto de humos. Su forma puede ser cilíndrica, trapezoidal o cónica. Sus dimensiones dependen de su forma y del tamaño de la hornilla, (Figura 8).

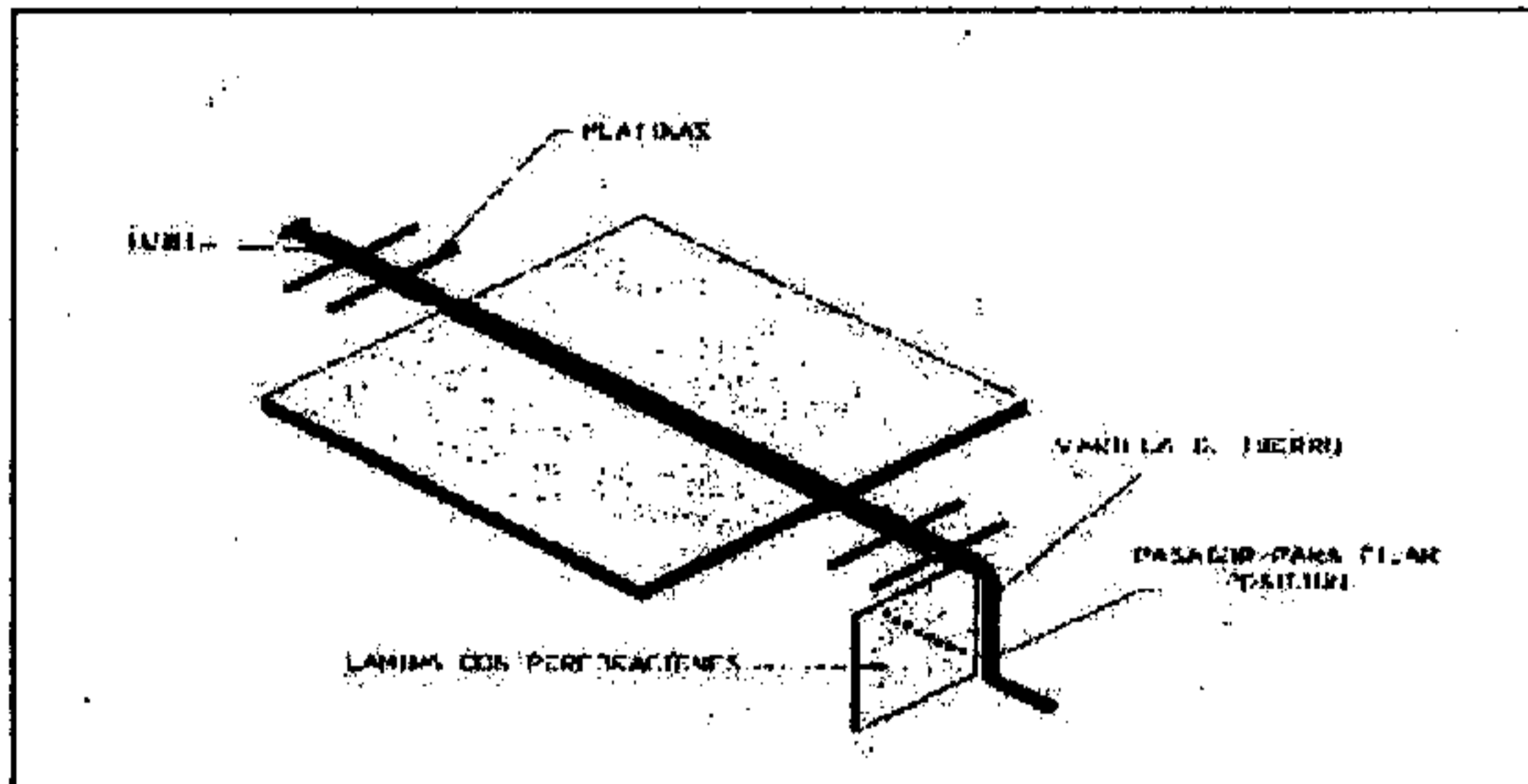


FIGURA 8. Chimenea.

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.

El aire para la combustión varía de acuerdo con la humedad del bagazo utilizado y por lo tanto el tiro debe ser regulado, para esto se cuenta con una *válvula tipo mariposa*, que permite hacer los ajustes requeridos (Figura 9).

FIGURA 9. Válvula mariposa.

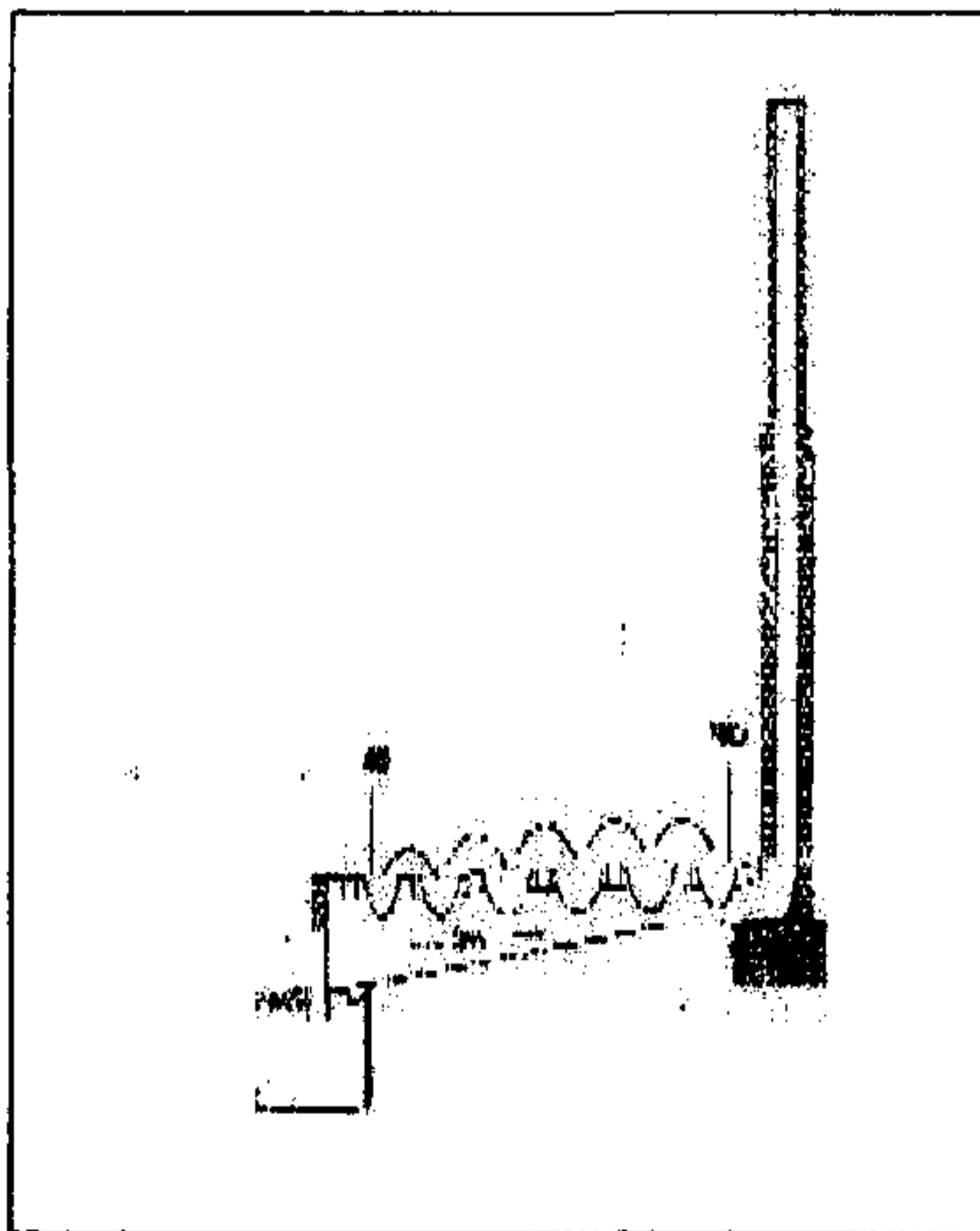


3. CLASIFICACION DE LAS HORNILLAS

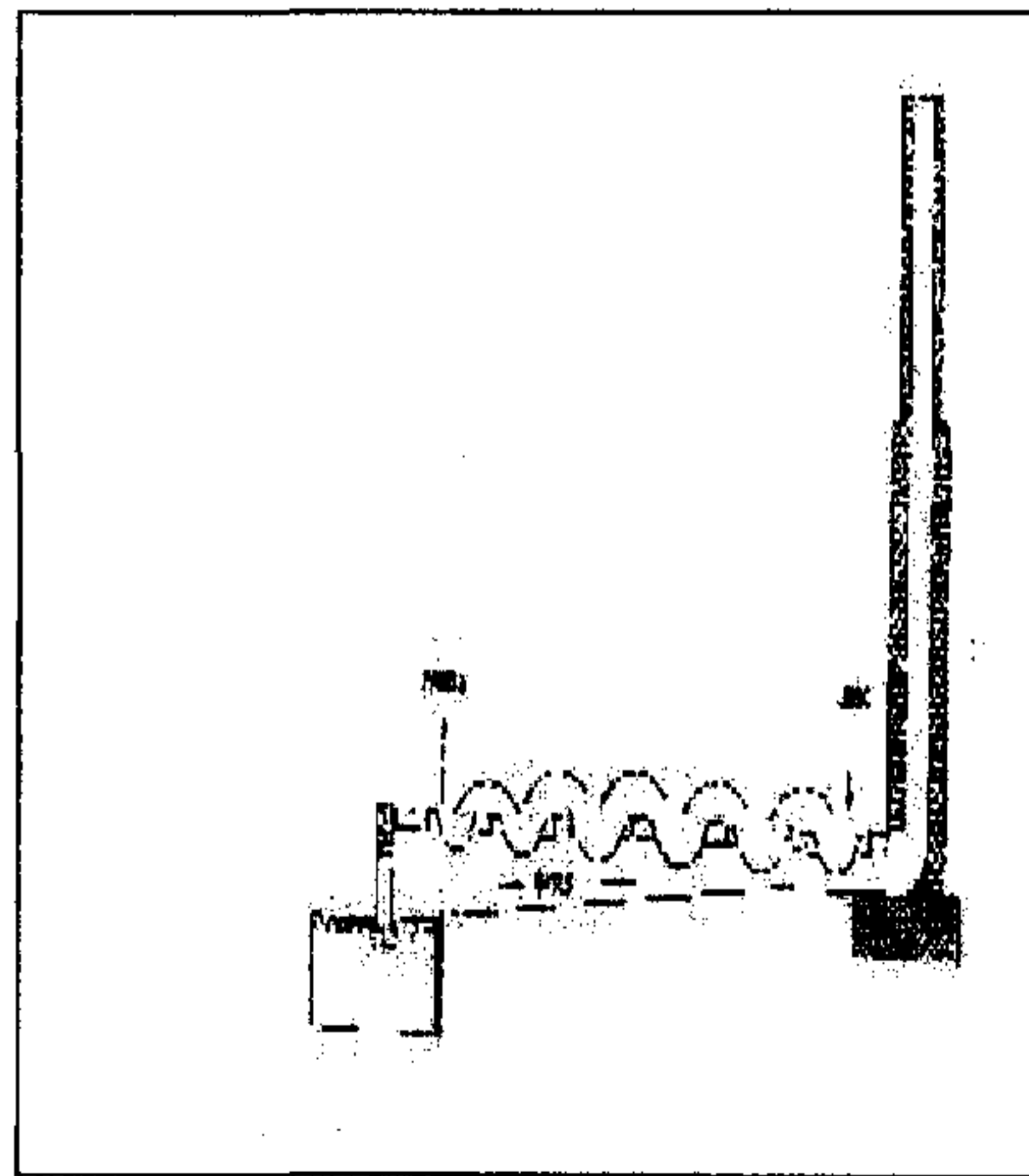
Existen diferentes tipos de hornillas, de acuerdo a la forma número y tamaño de las pailas, pero la diferencia básica radica en la dirección de los jugos con relación a la dirección del flujo de los gases de la combustión.

Según lo anterior, se tienen hornillas de *flujo paralelo*, *contraflujo* y *combinado*, (Figura 10). En las primeras los jugos avanzan en el mismo sentido que los gases. Este tipo de hornillas predomina en las zonas paneleras de Nariño, Antioquia, Caldas y Risaralda.

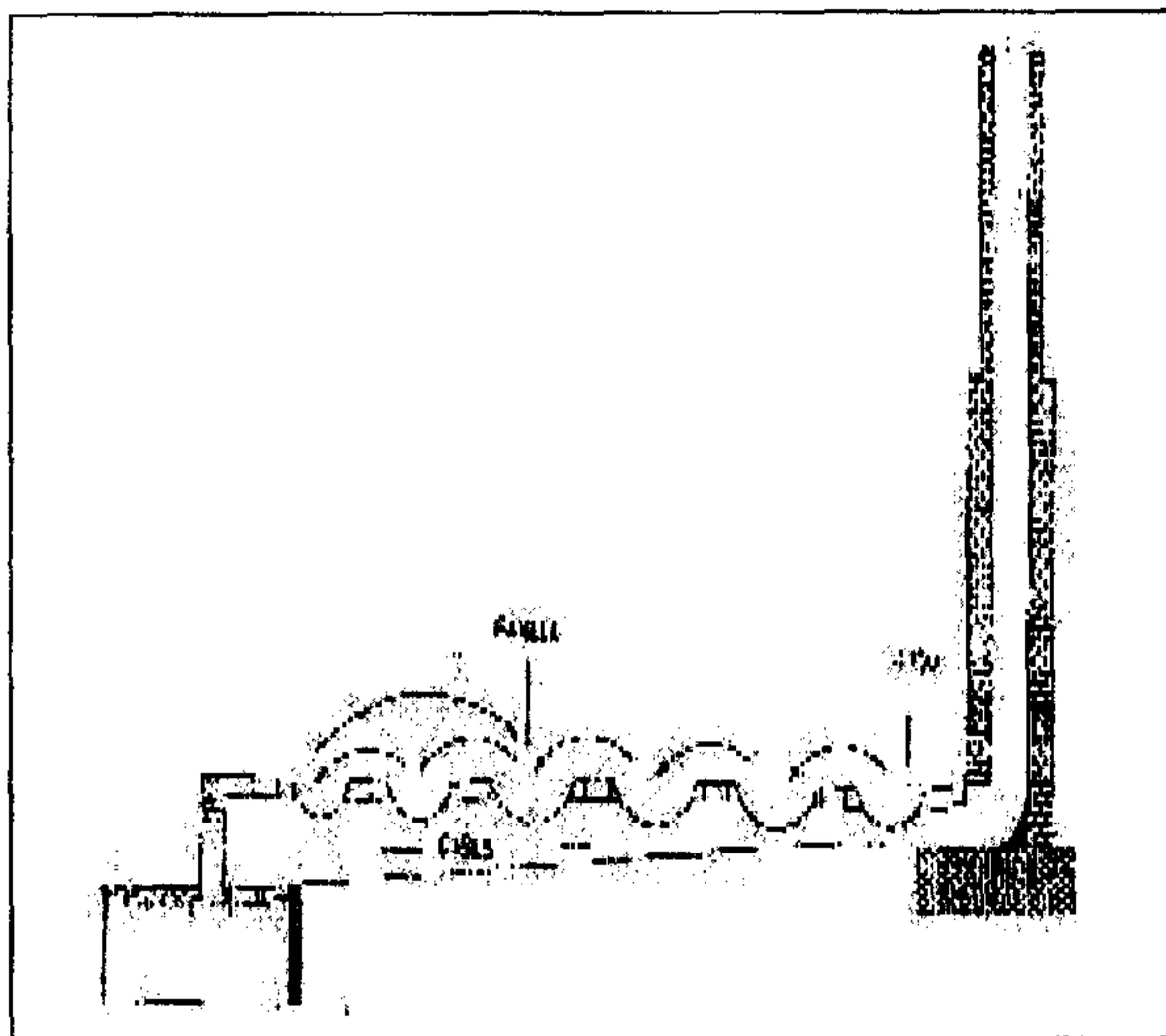
En las hornillas en contraflujo los jugos llevan dirección contraria a los gases. El jugo se recibe en la paila cercana a la chimenea y la panela se puntea cerca a la cámara de combustión. Existen algunas de estas hornillas en Santander y Cundinamarca.



Flujo paralelo



Contraflujo



Flujo combinado

FIGURA 10. Diferentes tipos de hornillas.

La mayor parte de las hornillas del país funcionan bajo el sistema de flujo combinado; es decir, inicialmente los jugos siguen la dirección opuesta al flujo de los gases y luego se mueven en el mismo sentido. Estas hornillas se encuentran principalmente en la Hoya del Río Suárez y Cundinamarca.

Con respecto a la *calidad de la panela*, las hornillas en contraflujo y en flujo combinado presentan ventajas sobre las de flujo paralelo, debido a que la *clarificación* se realiza en el sector de menor temperatura de la hornilla, lo cual garantiza un mayor tiempo para la acción de los clarificantes en el proceso de retención de impurezas.

Así mismo, la evaporación del agua y concentración de las mieles se hace en los puntos de mayor temperatura, logrando reducir el tiempo de residencia de las mieles en la hornilla, evitando la formación de azúcares reductores y la coloración oscura de la panela.

En las hornillas en paralelo la clarificación se realiza en los puntos de mayor temperatura, lo cual obliga a manejar grandes volúmenes de jugo para lograr una clarificación adecuada. Como la concentración se hace en el sector de más baja temperatura, éstas hornillas requieren un mayor número de pailas para esta parte final del proceso.

4. COMBUSTION EN LAS HORNILLAS

La combustión es el proceso por el cual un combustible reacciona con el oxígeno contenido en el aire para liberar su energía interna

COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LAS HORNILLAS

La energía utilizada en la evaporación del agua y concentración de los jugos en la hornilla, proviene de diferentes combustibles entre los cuales prima el bagazo producido por la misma caña. Además de éste se utilizan otros como leña, caucho, carbón, guadua y cizco de café.

La energía obtenida de un combustible depende de la cantidad utilizada y de su *poder calorífico*, que se define como la energía interna de un material, por unidad de masa, que es liberada en el momento de la combustión.

El valor calorífico neto de bagazo, en función de la humedad se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$VCN = 17,765 - 20,27 \times \frac{H_B}{100} \quad 1$$

VCN = Valor calorífico neto del bagazo, MJ/kg.

H_B = Humedad del bagazo, % (b.h.)

La humedad del bagazo 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. En la tabla 1. se presentan los resultados de humedad de bagazo en función de la fibra de la caña y de la extracción del molino.

Tabla 1. Humedad del bagazo a la salida del molino en función de la extracción y la fibra de caña

Fibra caña %	Extracción %	Humedad %
11	50	66
	55	61
	60	56
14	50	61
	55	56
	60	51
17	50	57
	55	52
	60	48

En la práctica el bagazo nunca se seca completamente y su contenido de humedad final depende tanto del tiempo de secado como de las condiciones ambientales de la zona. Por eso, para utilizarlo en las hornillas tradicionales, es necesario dejarlo secar en cobertizos denominados bagaceras, hasta cerca del 30%, en donde presenta las mejores condiciones como combustible en esas hornillas. En la Tabla 2. se presenta el valor calorífico del bagazo a 30% de humedad y de otros combustibles empleados en las hornillas.

TABLA 2. Valor calorífico neto de algunos combustibles utilizados en las hornillas.

Combustible	Valor Calorífico Neto (MJ/kg)
Bagazo (30% humedad)	11,7
Leña (20% humedad)	14,6
Carbón Semibituminoso	25,6
Carbón Bituminoso	30,2

COMPOSICION DE LOS GASES DE COMBUSTION Y CALCULO DEL FLUJO MASICO.

En la combustión del carbono (C) del bagazo se pueden presentar dos reacciones una en donde la combustión es incompleta siendo el producto final el monóxido de carbono (CO), como se muestra en la ecuación 7 y otra en donde la combustión es completa y se obtiene dióxido de carbono (CO₂), que se presenta en la ecuación 8.



Uno de los limitantes de los combustibles sólidos es la dificultad de lograr una mezcla adecuada entre el combustible y el aire, siendo necesario agregar una mayor cantidad del aire calculado para lograr una mejor combustión. En la práctica se ha determinado que las mejores condiciones para la combustión del bagazo en las hornillas se dan cuando el exceso de aire varía entre el 40% y el 60% del aire teórico.

CAMARA DE COMBUSTION

La cámara de combustión es el espacio de la hornilla donde se realiza la combustión del bagazo; su forma es variable y depende del tipo y calidad del bagazo a utilizar.

Los diferentes tipos de cámara de combustión para las hornillas paneleras son: Tradicional, Tradicional mejorada por CIMPA, Ward y Ward tipo CIMPA (Figuras 11, 12 y 13).

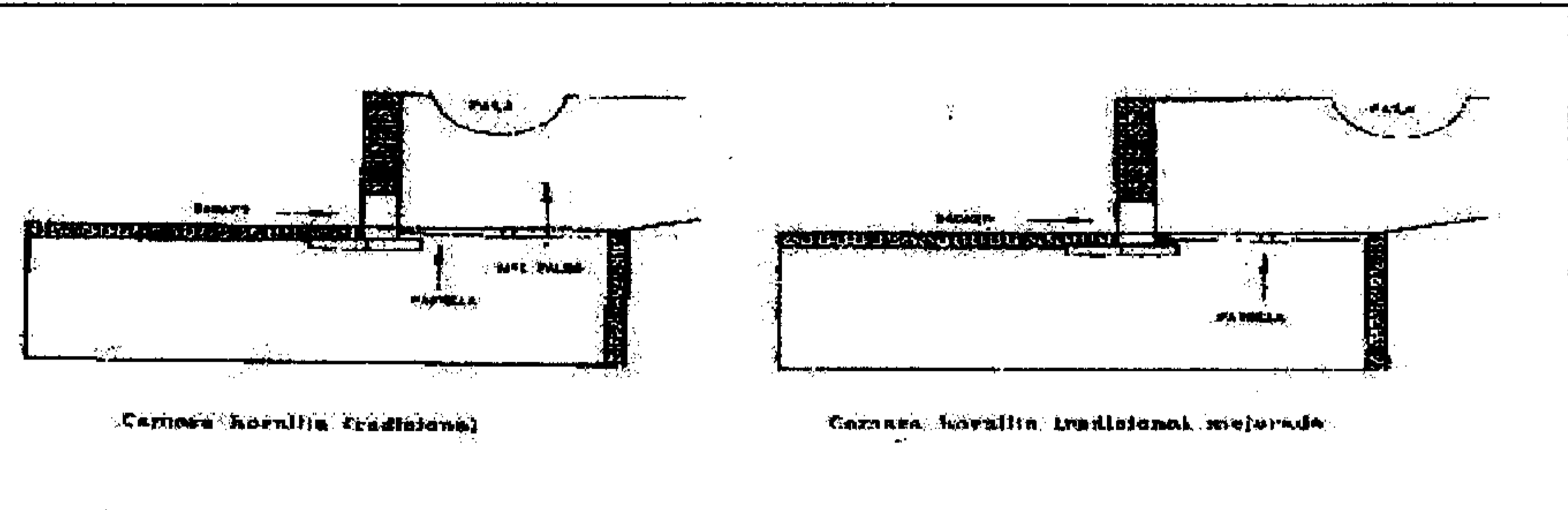


FIGURA 11. Cámaras para hornillos tradicional y tradicional mejorada.

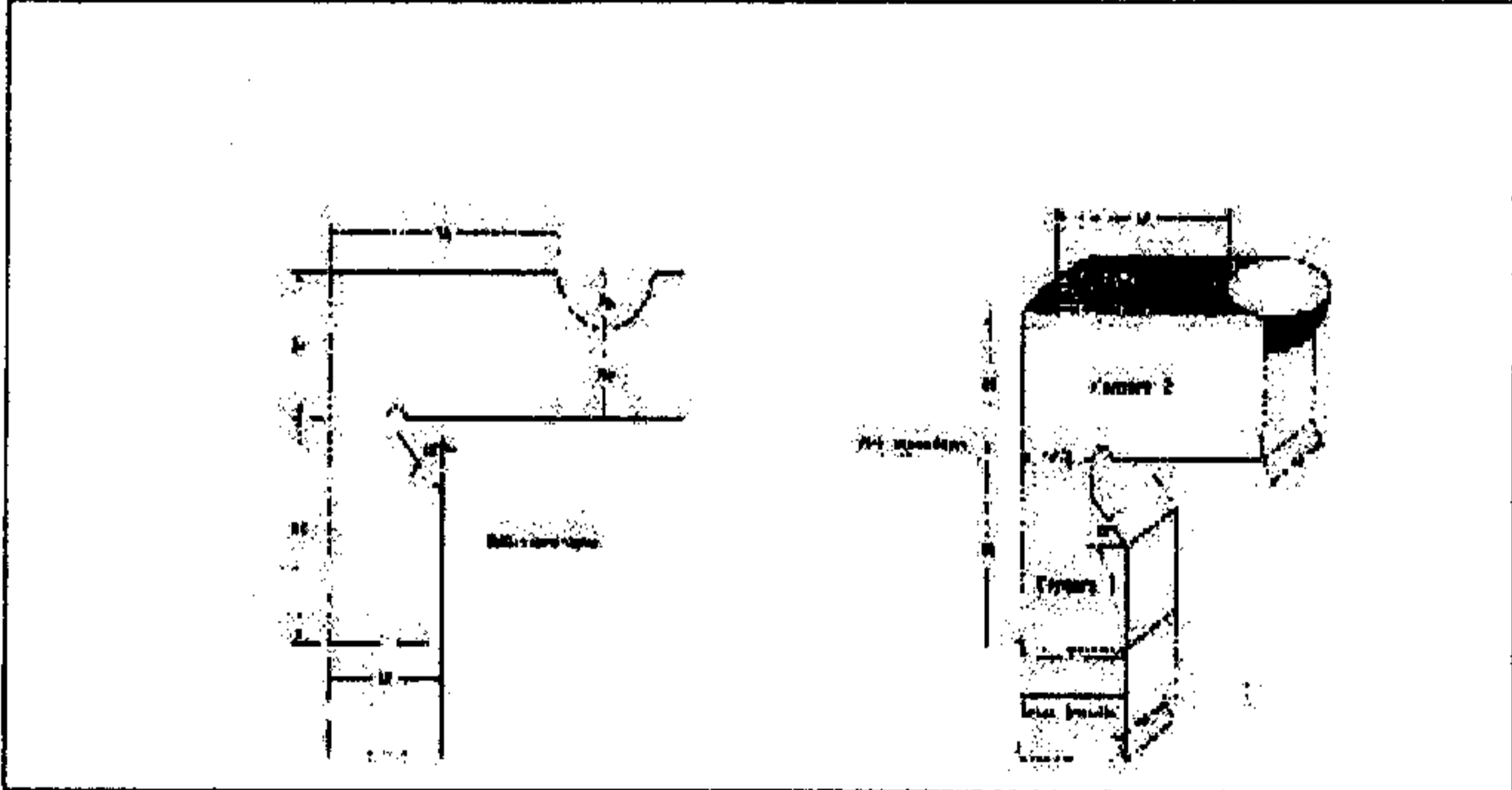


FIGURA 12. Cámara de combustión tipo WARD.

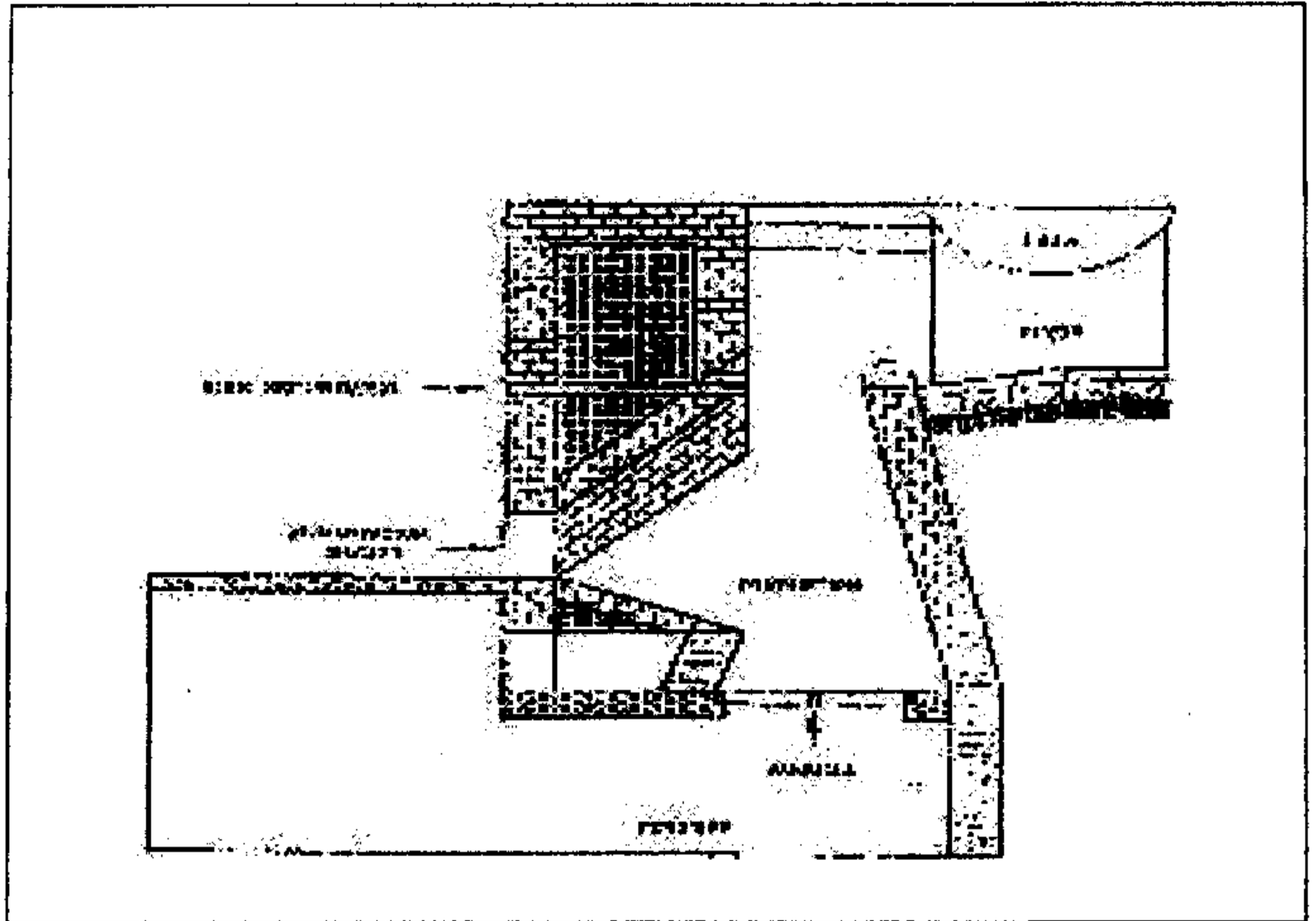


FIGURA 13. Cámara de combustión tipo CIMPA.

En la *cámara tradicional* el área de la parrilla es demasiado grande, lo cual permite la entrada de aire falso que enfría los gases, causando temperaturas de combustión bajas (850°C , con bagazo de 30% de humedad); además, la presencia de la superficie relativamente fría de las pailas directamente sobre la cámara ocasiona una combustión incompleta, presentándose porcentajes elevados de *CO* (6 a 7 %).

En la *cámara tradicional mejorada* el área de la parrilla se diseña de tal forma que disminuye la entrada de aire falso, consiguiéndose temperaturas de combustión un poco mayores que en la cámara tradicional (950°C) y las pailas están ubicadas más lejos del lecho de bagazo lo cual permite una combustión más completa, con porcentajes de *CO* del 5%, aproximadamente.

En la *cámara tipo Ward* se logran mayores temperaturas (1100°C en promedio con bagazo de 30% de humedad) y la combustión es mejor consiguiéndose porcentajes de *CO* menores del 4%.

Solamente el 70% del aire necesario para la combustión (*aire primario*) entra a través de la parrilla, permitiendo que ocurra una primera combustión; luego, los gases de combustión, incluyendo los volátiles suben y en el punto de la restricción o garganta existente en la cámara (Figura 12), se mezclan con el aire restante o *aire secundario* (30%), suministrado a través de orificios dispuestos para ello. En el espacio entre la garganta y la primera paila, denominado *segunda cámara de combustión* se completa la combustión (Figura 12).

Esta cámara permite utilizar bagazo con humedades de hasta el 45%, ya que por su forma, la radiación del arco hace un presecado de este.

La *cámara Ward tipo CIMPA* es una cámara Ward a la cual se le adicionó una subcámara de presecado de bagazo. En esta subcámara se seca el bagazo de tal forma que permite quemarlo con mayor humedad que en la cámara anterior (Figura 13).

La temperatura de combustión depende de la humedad del bagazo utilizado. Con bagazo del 50% se alcanzan temperaturas hasta de 950°C y con bagazo con menor contenido de humedad se alcanzan temperaturas que pueden alcanzar los 1200°C.

SELECCION DE CAMARAS

Para seleccionar el tipo de cámara a utilizar en una hornilla es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Humedad y tamaño del bagazo.
- Temperaturas requeridas.
- Capacidad de la hornilla.
- Aspectos socioculturales regionales.
- Aspectos económicos.

La humedad del bagazo utilizado en la hornilla y el tipo de cámara presentan gran influencia sobre la temperatura de combustión. En la Tabla 3, se resumen las temperaturas alcanzadas en los diversos tipos de cámara, en función de la humedad del bagazo.

TABLA 3. Temperaturas de combustión en función del tipo de cámara y la humedad del bagazo

HB (%)	Temperatura (°C)			
	Tradicional	Mejorada	Ward	CIMPA
15	1000	1050	1200	1200
30	900	1000	1100	1100
40	750	800	1050	1050
45	-	-	1000	1000
50	-	-	900	950
55	-	-	-	850

Es importante anotar que para un mismo tamaño de hornilla la capacidad de producción se aumenta cuando la temperatura de combustión es mayor, pero para obtener temperaturas mayores a 1000°C en las cámaras tradicionales, se requiere de un tiempo prolongado en el secado de bagazo antes de su utilización; mientras que en las cámaras Ward y Ward tipo CIMPA, el tiempo de secado es menor.

La construcción de las cámaras tipo Ward y Ward tipo CIMPA implica un incremento en los costos de la hornilla, pero bajo las mismas condiciones, se obtiene un aumento en la capacidad de producción;

por lo tanto, para cada caso se debe hacer un estudio económico que sirva como base para definir el tipo de cámara.

MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE LAS CAMARAS

- Parrilla

Tradicionalmente se construye en ladrillo o rieles de ferrocarril pero su vida útil es muy corta, además de que el área libre no alcanza el 50% lo cual dificulta la entrada de aire para la combustión y aumenta la resistencia al paso del aire a través de ella ocasionando un aumento de la longitud de la chimenea; por este motivo en las hornillas mejoradas se fabrica en fundición de hierro gris (Figura 5).

- Puerta

En algunos casos se construye en lámina de hierro pero no es recomendable debido a las deformaciones ocasionadas por el calor por lo cual se deben construir en hierro gris.

- Cámara

El ladrillo utilizado debe soportar cambios de temperatura en rangos que varían de acuerdo al tipo de cámara a construir entre 700 y 1200°C (Tabla 3). Para temperaturas menores a 950°C se utilizan ladrillos semirefractarios que se fabrican generalmente en las zonas paneleras del país, los cuales se pegan con un mortero hecho con una mezcla de arena, arcilla, cal y cemento en las siguientes proporciones (% en peso):

Arena	30 %
Arcilla	45 %
Cemento	15 %
Cal	10 %

Para temperaturas mayores a 950 °c, se deben usar ladrillos refractarios los cuales están diseñados para soportar eficientemente temperaturas entre 1.200°C y 1.800°C, según la clase de ladrillo. El ladrillo corriente se calcina rápidamente cuando las temperaturas son elevadas y es necesario reparar la hornilla frecuentemente. En el caso de utilizar refractarios el mortero utilizado debe ser el recomendado por el fabricante del ladrillo.

RECOMENDACIONES PARA UNA BUENA COMBUSTION

Los siguientes puntos son importantes para obtener una combustión completa, es decir con alta temperatura y bajas pérdidas en combustión:

- La cantidad de bagazo suministrado y sus características deben ser las del diseño, ya que en estas condiciones la hornilla presenta un óptimo comportamiento.
- El suministro de bagazo en pequeñas cantidades con alta frecuencia provoca una combustión buena y estable.
- Cuando el bagazo fresco cae encima el arrume de bagazo, tiene la posibilidad de secarse antes de quemar.

- Es necesario una buena limpieza de la parrilla, para garantizar una entrada regular de aire. Además, hay que evitar la formación de 'torta' de cenizas.
- Para obtener una combustión buena se necesita suministrar al bagazo más aire que el estrictamente necesario; el exceso de aire ("relación" entre la cantidad de aire actual y la cantidad de aire mínimo para la combustión). En general el exceso de aire está entre 1,40 y 1,60 ya que los gases se enfrían demasiado con un exceso de aire superior.
- Hay que evitar 'áreas frías' (por ejemplo pailas) sobre la cámara de combustión. Dichas áreas rompen la combustión y estimulan la formación de hollín, hidrógeno y monóxido de carbono. El proceso de transferencia de calor se debe empezar cuando se haya completado la combustión.

5. CALOR REQUERIDO EN LA ELABORACION DE LA PANELA

CALOR REQUERIDO EN LA CLARIFICACION

En la clarificación la temperatura de los jugos se aumenta desde la temperatura ambiente hasta la de ebullición. El calor sensible requerido para llevar los jugos hasta las condiciones anteriores está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{ctr} = \frac{m_j C_{p_j} (T_e - T_a)}{3600} \quad 4$$

$$C_{p_j} = 4.18 (1 - 0.006 B_j)$$

Donde:

- C_{p_j} = Calor específico de los jugos, kJ/kg °c.
- Q_{ctr} = Flujo de calor requerido en la clarificación, kW.
- T_e = Temperatura de ebullición del jugo, °c.
- T_a = Temperatura ambiente, °c.

EVAPORACION

En términos promedios el jugo alcanza el punto de ebullición a 95°C . Después de la clarificación de los jugos, se inicia la evaporación removiendo casi un 89% del agua presente en el jugo clarificado. Los sólidos solubles existentes en el jugo pasan de un brix inicial cercano a 17° a 65°B.

CALOR REQUERIDO PARA LA EVAPORACION

El calor latente de evaporación depende de la cantidad de agua a evaporar para llevar los jugos hasta una concentración de 65°Brix y está dado por:

$$Q_{evp} = \frac{\Delta H_v (m_{clr} - m_{evp})}{3600} \quad 6$$

$$m_{evp} = \frac{m_{clr} B_j}{65} \quad 7$$

Donde:

- Q_{evp} = Flujo de calor requerido en la evaporación, kW.
 ΔH_v = Calor latente de evaporación del agua, kJ/kg.
 m_{clr} = Masa de jugo clarificado, kg/h.
 m_{evp} = Masa de jugo a la salida de la etapa de clarificación, kg/h.

CONCENTRACION

Cuando los jugos alcanzan los 65°B (102-106°C), se inicia el proceso de concentración. Esta es una separación simbólica, donde los jugos cambian su nombre por el de mieles, en este punto se debe agregar a las mieles un antiadherente y antiespumante como cebo, aceite vegetal o cera de laurel; continuándose el proceso de evaporación hasta retirar el agua que se necesite para llegar al brix de panela (90-93°). En la concentración se remueve entre el 9 y el 10% del agua que traía el jugo clarificado.

Las mieles alcanzan el punto de panela entre 116 y 126°C, normalmente. Cuando la temperatura de punteo es baja, la panela presenta una mala textura y el contenido de humedad es demasiado alto, entre 10 y 12%, deteriorándose en muy corto tiempo. En la proporción en que suba el punto de la panela, se reduce la humedad en el producto final y se mejoran las características físicas y se conserva más tiempo en el almacenamiento.

Se ha comprobado que la velocidad de formación de azúcares reductores esta influenciada por el tiempo de residencia de los jugos en la hornilla, el pH y la temperatura. Se debe procurar que el tiempo de residencia no sea mayor de 2,5 horas, y que la etapa de concentración se realice en la forma más rápida posible, ya que a temperaturas superiores a 100°C el proceso de inversión se acelera en forma notable.

CALOR REQUERIDO EN LA CONCENTRACION

Puede calcularse a partir de la siguiente relación:

$$Q_{con} = \frac{\Delta H_v (m_{evp} - m_p)}{3600}$$

$$Q_{req} = Q_{clr} + Q_{evp} + Q_{con}$$

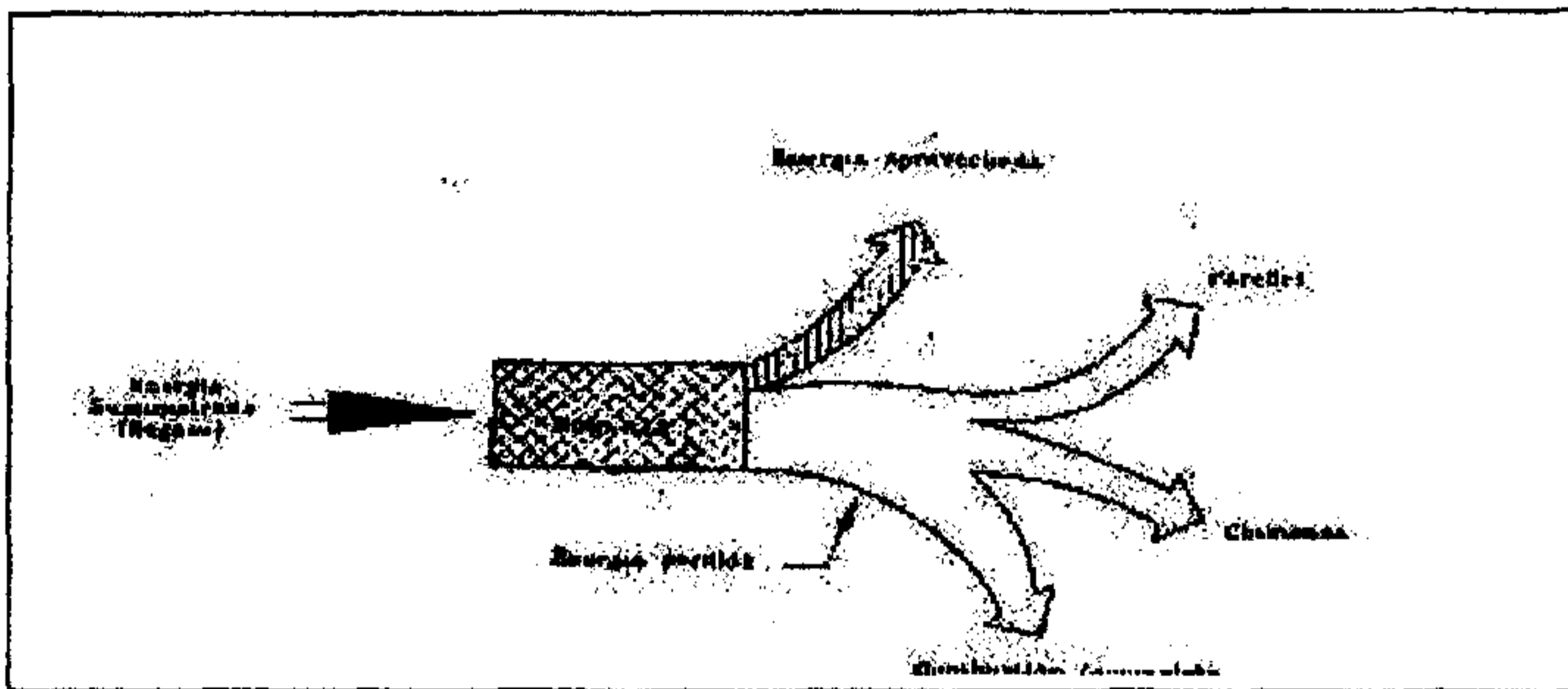
$$Q_{req} = \frac{m_j C_{p_j} (T_a - T_e) + m_{H_2O} \Delta H_v}{3600}$$

m_{H_2O} = Masa de agua total evaporada en el proceso de obtención de panela, kg/h.

6. BALANCE DE ENERGIA DE LAS HORNILLAS

Como se observa en la Figura 14, de la energía suministrada a la hornilla por el bagazo una parte se aprovecha por los jugos y la restante se pierde por:

- Combustión incompleta.
- Calor sensible de los gases en la chimenea.
- Disipación a través de las paredes y el ducto.



Las pérdidas de energía por combustión incompleta se deben a que en la combustión gran parte del carbono contenido en el bagazo al reaccionar con el oxígeno forma monóxido de carbono (CO) y no alcanza a formar el dióxido de carbono (CO_2). Se estima que por cada 1% de CO en los gases de combustión las pérdidas son del orden del 4.5%. (Figura 15).

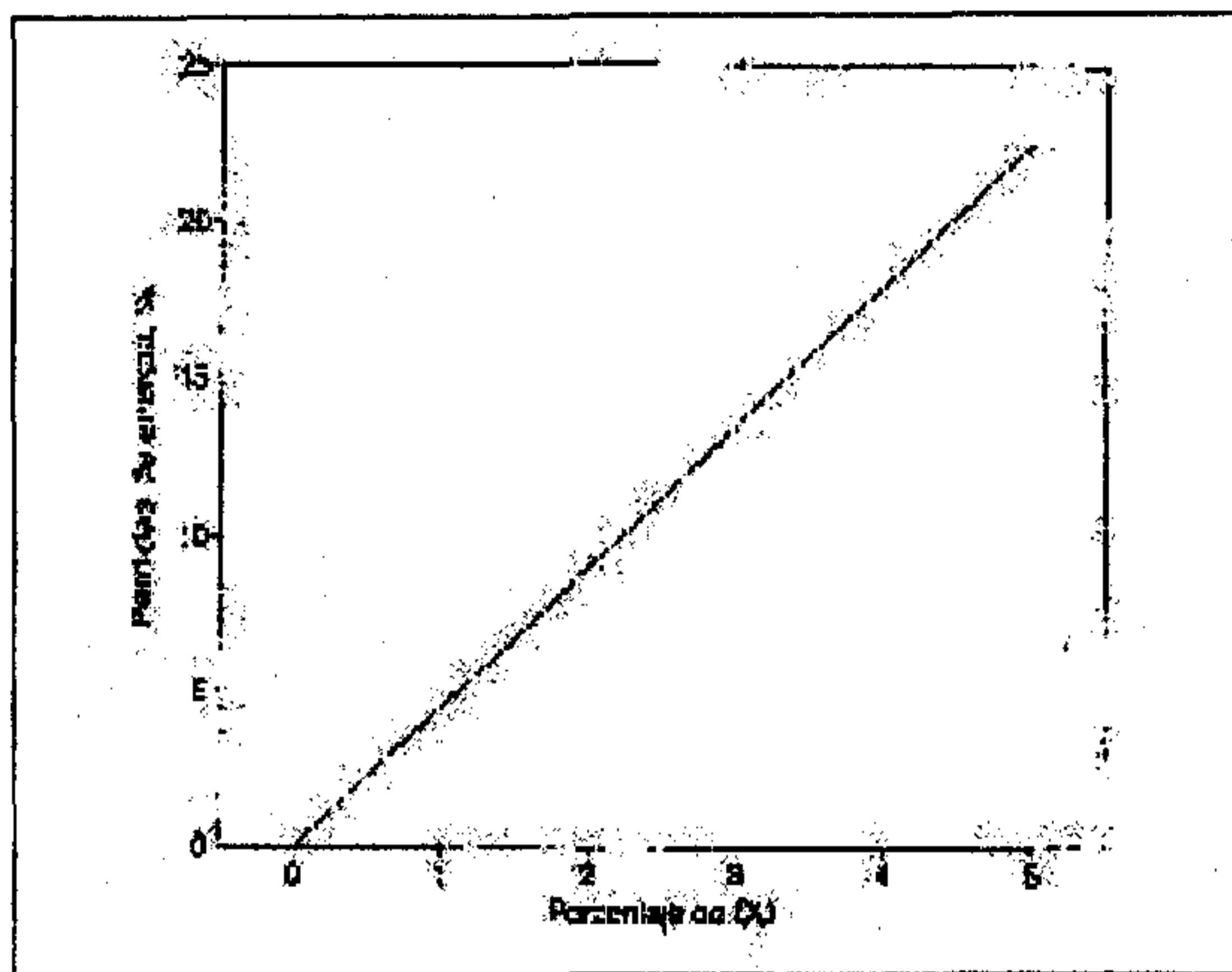


FIGURA 15. Pérdidas de energía por combustión incompleta del bagazo.

Para disminuir las pérdidas por la formación de monóxido de carbono es recomendable el diseño adecuado de la cámara de combustión siguiendo las recomendaciones de selección y diseño dadas anteriormente.

Por otra parte, las investigaciones realizadas por CIMPA⁽⁹⁾ se encontró que en la mayoría de las hornillas existentes en el país, el porcentaje de CO en los gases alcanza un valor promedio de 10%.

Las pérdidas en la chimenea se deben a la alta temperatura de los gases a la salida y son función de la humedad del bagazo utilizado y del exceso de aire en la combustión (Figura 16). Se estima que las pérdidas en la chimenea de las hornillas son del orden del 30%, por que se registran temperaturas promedio de los gases cercanas a $700^{\circ}C$ y excesos de aire *negativos*, es decir, que el aire que se suministra en la combustión es menor que el requerido.

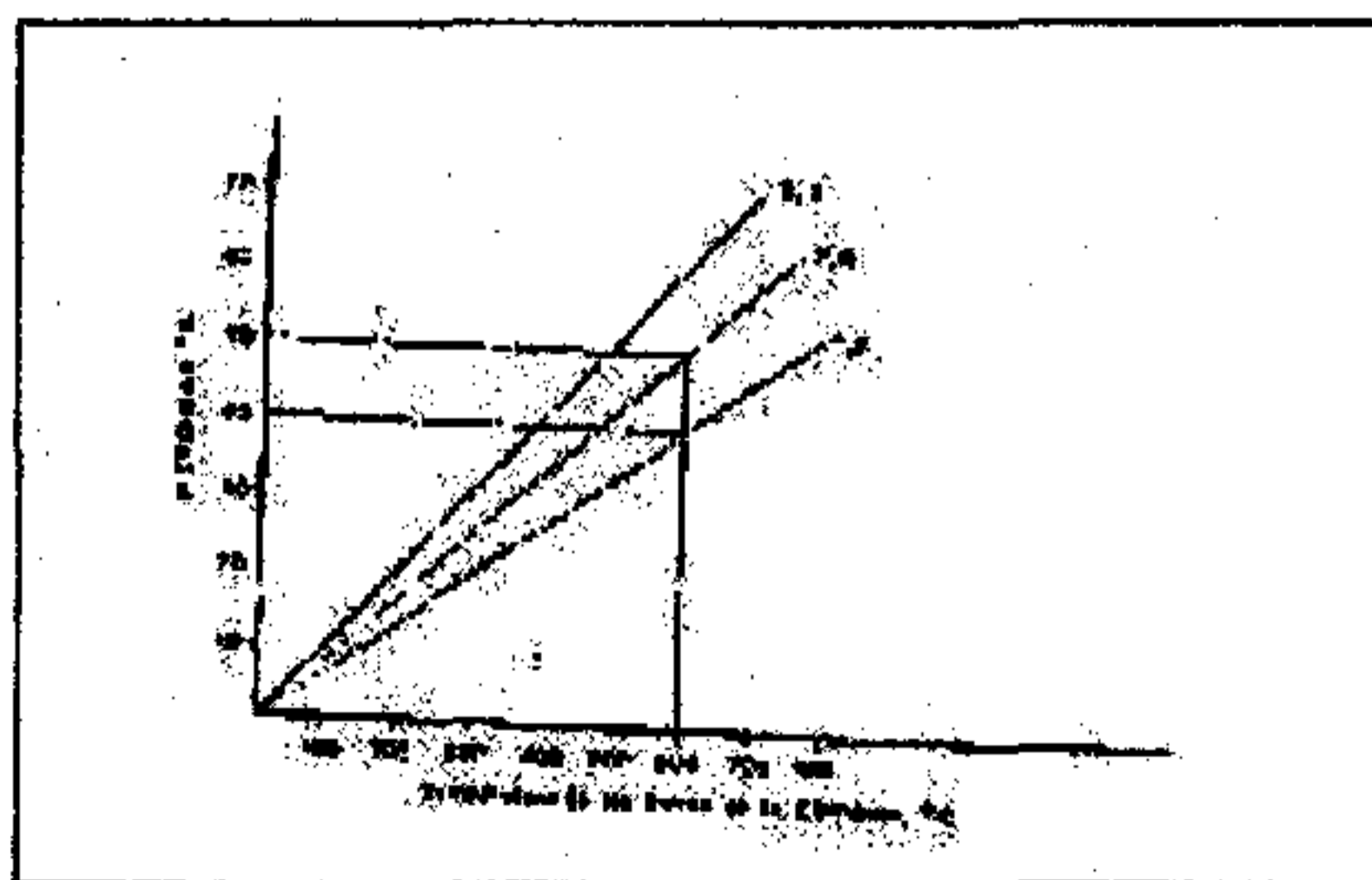


FIGURA 16. Pérdidas en la chimenea, en función del exceso de aire y la temperatura, para una humedad de bagazo del 30%.

También se encontró que una de las causas de las altas temperaturas en la chimenea es la falta de una mayor área para transferencia de calor entre las pailas y los gases de combustión. El incremento del área de transferencia de calor se puede conseguir con pailas más grandes o con un mayor número de

ellas. Sin embargo, esto se traduce en hornillas de gran tamaño incrementando los tiempos de residencia de los jugos causando un desmejoramiento en la calidad de la panela.

Para evitar estos inconvenientes CIMPA ha diseñado pailas planas con aletas longitudinales que incrementan el área de exposición y la ganancia de calor (Figura 7). Estas pailas se pueden fabricar en aluminio fundido o en láminas de hierro soldadas. Además de lo anterior, se debe tener un diseño adecuado del ducto para disminuir las temperaturas de los gases en la chimenea.

Las pérdidas de calor a través de las paredes y el piso del ducto son relativamente bajas (7%), ya que las hornillas se construyen empotradas en la tierra que les sirve de aislante. Con el fin de disminuir aún más las pérdidas de calor, CIMPA recomienda construir las paredes en doble hilada de ladrillo, separada por una capa de cascarilla de arroz de diez centímetros de espesor. Al no disponer de cascarilla, ésta puede ser sustituida por materiales aislantes como ceniza y arena seca o simplemente aire estancado (Figura 17).

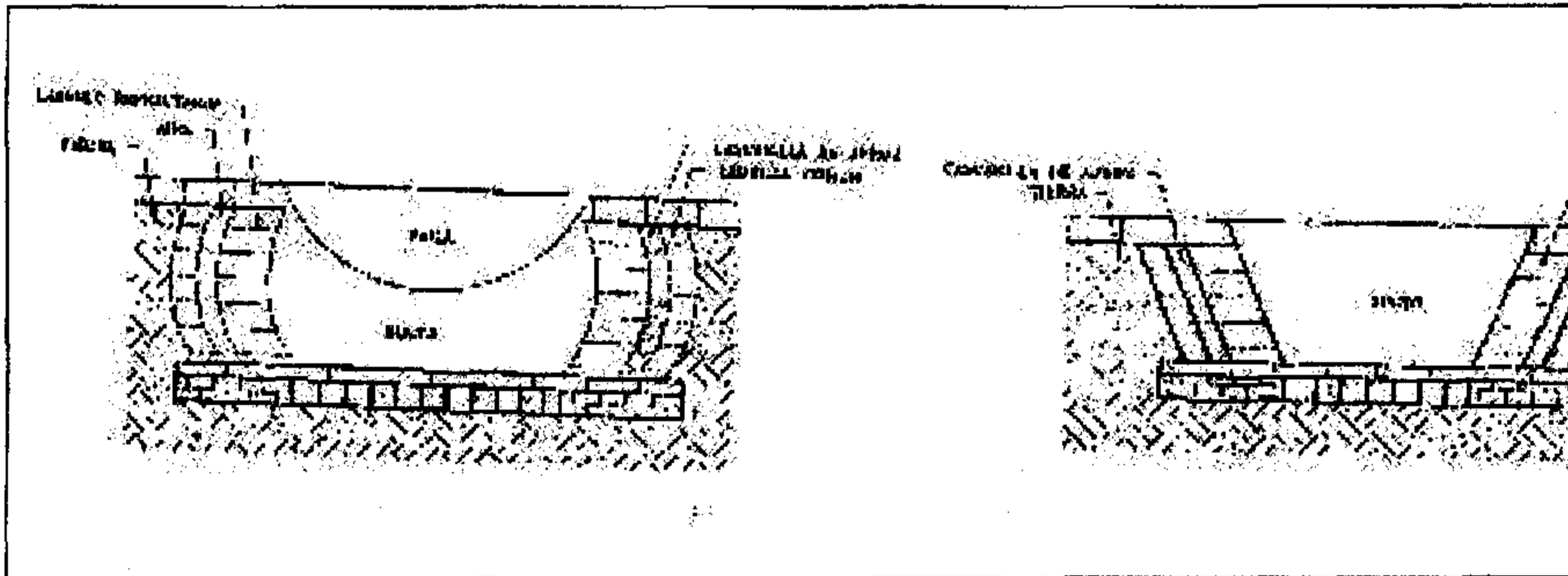


FIGURA 17. Secciones transversales típicas del ducto.

Resumiendo lo anterior, se puede anotar que las hornillas tradicionales del país solamente aprovechan un 33% de la energía suministrada por el bagazo, en el mejor de los casos.

En la mayor parte de las hornillas solo se alcanza entre 20 y 25% de eficiencia y existen casos de hornillas de 15% de eficiencia.

EFICIENCIA TERMICA

El balance térmico de la hornilla puede expresarse de la siguiente forma (Figura 15)

$$Q_{sum} = Q_{apr} + Q_{perd} = Q_{req} + Q_{perd}$$

8

- Q_{perd} = Calor total perdido, kW
- Q_{apr} = Calor aprovechado en la producción de panela, kW
- Q_{sum} = Calor suministrado, kW
- Q_{req} = Calor requerido, kW

La relación entre el calor aprovechado para la producción de panela y el calor suministrado por el bagazo se define como eficiencia térmica:

$$Eff = \frac{Q_{apr}}{Q_{sum}} \times 100 \% \quad 9$$

Donde:

Eff = Eficiencia térmica, %

La eficiencia térmica determina la cantidad de energía aprovechada en la hornilla, al igual que la autosuficiencia energética del trapiche. La autosuficiencia se consigue cuando el bagazo producido por el molino es igual o mayor al consumido por la hornilla. Para establecer el nivel de autosuficiencia de un trapiche se necesita conocer la eficiencia térmica de la hornilla, el brix del jugo, la cantidad de caña a moler, su contenido de fibra, la cantidad de bagazo producido y el porcentaje de extracción alcanzado en el molino.

La cantidad de caña a moler se calcula a partir de la siguiente relación:

$$m_c = \frac{m_j}{Extr} \quad 10$$

m_c = Consumo de caña por hora, kg/h

m_j = Flujo de jugo por hora, kg/h

Extr = Extracción de jugo, %

La cantidad de bagazo producido por el molino es:

$$m_{BV} = m_c - m_j \quad 11$$

Donde:

m_{BV} = Bagazo verde producido en el molino, kg/h

El peso de este bagazo disminuye por efecto de secado en la bagacera y depende de la humedad con la que sale del molino y la del bagazo que se va a utilizar en la hornilla.

$$m_{BS} = m_{BV} \frac{100 - H_{BV}}{100 - H_B} \quad 12$$

Donde:

- H_{BV} = Humedad del bagazo verde según Tabla 3, % (b.h.).
 H_B = Humedad del bagazo utilizado en la hornilla, % (b.h.).
 m_{BS} = Bagazo seco producido en el molino, kg/h.

La masa de bagazo requerida en la hornilla debe ser igual a la del bagazo producido en el molino y está dada por:

$$m_B = \frac{Q_{sum}}{VCN} \quad 13$$

Donde:

- m_B = Bagazo requerido en la hornilla, kg/h.

Como se dijo anteriormente, m_{BS} debe ser mayor o igual a m_B .

SELECCION DE LAS PAILAS Y EL DUCTO

Las pailas y el ducto se seleccionan de acuerdo a las necesidades de producción de panela y la función que van a desempeñar: evaporación, clarificación o concentración.

Es recomendable usar pailas semiesféricas o semicilíndricas cuando el paso de los jugos se hace manualmente; cuando se mueven por gravedad, a través de tubería, deben utilizarse pailas planas o aleteadas, siempre y cuando la concentración de los jugos sea menor a 75°Brix. Para concentraciones mayores, se dificulta el flujo de los jugos a través de tubería y es conveniente usar pailas redondas.

MATERIALES Y CONSTRUCCION DEL DUCTO

Las temperaturas más altas de los gases en una hornilla panelera se registran en la cámara de combustión y va disminuyendo a medida que estos se acercan a la chimenea. Dependiendo de su posición con respecto a la cámara de combustión, se considera que el ducto tiene dos secciones: en la primera, denominada *zona caliente* debido a su proximidad a la cámara, la temperatura de los gases de combustión es elevada; en la segunda, la temperatura de los gases de combustión es relativamente baja y se denomina *zona fría*.

En la zona caliente, las paredes del ducto se construyan en ladrillo refractario, que soporta temperaturas hasta 1200°C; los morteros utilizados en esta zona también deben ser refractarios, utilizando los recomendados por el fabricante.

El espesor de las pegas de los ladrillos se deben hacer lo más pequeñas posibles nunca superior a 5 mm.

En la zona fría las paredes y el piso del ducto se pueden construir con ladrillo menos refractario que soporte temperaturas hasta 800°C utilizando pegas a base de cemento, arcilla, cal y arena, con las mismas proporciones que las utilizadas en las paredes externas de la cámara de combustión.

Para disminuir las pérdidas de energía a través del piso y las paredes, el ducto debe aislarse térmicamente, utilizando una doble pared y un doble piso. Entre las dos paredes se debe dejar una cámara de aire estanco o en su defecto en el mejor de los casos rellenar esta cámara con cascarilla de arroz. El piso también debe llevar la cámara de aire que puede ser llenada con cascarilla de arroz. En la Figura 17, se pueden ver dos secciones transversales del ducto.

7. CHIMENEA

En una hornilla los gases producto de la combustión son transportados desde la cámara de combustión a través del ducto. Los gases, como cualquier fluido requieren para su transporte de una fuerza motriz, que en el caso de las hornillas es generada por la chimenea, considerada como un ventilador que trabaja a succión. Esta fuerza, debe ser suficiente para vencer la resistencia al paso de los gases generada por las pérdidas de presión a través de toda la hornilla.

EFFECTO DE CHIMENEA O TIRO

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 de combustión.

La chimenea genera un tiro (\underline{P}) debido a la diferencia entre la densidad del gas caliente contenido en su interior y la columna de aire en el exterior de la misma, es decir:

$$\Delta P = (\delta_A - \delta_G) H$$

Donde:

- \underline{P} = Tiro generado por la chimenea, kg/m² o mm H₂O
- δ_A = Peso específico del aire, kgf/m³
- δ_G = Peso específico de los gases de combustión, kgf/m³
- H = Altura teórica de la chimenea, m

8. MANEJO, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LAS HORNILLAS PANELERAS.

MANEJO Y OPERACION

El proceso de producción de panela es complejo y por lo tanto se requiere que los operarios que manejan la hornilla tengan la suficiente experiencia con el fin de evitar problemas en la calidad de la panela y daños en las partes de la hornilla (parrillas, cámara, pailas, ducto, chimenea etc).

Las características del bagazo utilizado en la hornilla deben ser las recomendadas en el diseño ya que en estas condiciones la hornilla presenta un comportamiento óptimo; en caso contrario, pueden presentarse déficit de bagazo, variaciones en la capacidad de diseño y desbalanceo térmico en las pailas

repercutiendo en una panela de baja calidad; sin embargo si hay necesidad de utilizar bagazo con características diferentes a las del diseño es necesario ajustar la válvula de la chimenea hasta conseguir una capacidad de producción aceptable con un mínimo consumo de bagazo.

Por otra parte, la cantidad de bagazo suministrado a la hornilla por hora, debe ser la recomendada en el diseño y su alimentación debe realizarse en pequeñas cantidades y alta frecuencia.

Cuando se utilizan cámaras Ward tipo CIMPA se recomienda que la puerta destinada a la limpieza de la parrilla permanezca cerrada excepto en los casos en que se deba utilizar bagazo con un humedades mayores a la sugerida en el diseño.

La parrilla debe descenizarse periódicamente para evitar la formación de escoria y por tanto el bloqueo para el paso de aire a través de ella.

El tiempo de residencia de los jugos en la hornilla influye notoriamente sobre la calidad de la panela; en la medida que estos permanecen más tiempo en las pailas, se aumenta la formación de azúcares reductores, ocasionando un producto final de baja dureza, para evitar esto, es importante que la cantidad de jugo manejada en la hornilla sea la mínima posible, sin que se llegue a extremos tales que no permita la adecuada limpieza de los mismos.

El nivel de jugo en las pailas semiesféricas siempre debe estar por encima de la línea de contacto con los gases de combustión con el fin de evitar quemaduras en estas, las cuales causan problemas en la calidad de la panela y disminuyen su vida útil.

Es recomendable que durante el proceso, las pailas dedicadas al trabajo con mieles de concentraciones mayores a 75°Brix se raspen periódicamente con el fin de retirar mieles pegadas en el fondo que forman capas que aíslan la paila y evitan el flujo de energía hacia los jugos causando disminución en la capacidad de producción de la hornilla y deterioro en las pailas. En el momento de raspar las pailas, no se debe alimentar bagazo a la hornilla ya que estas se desocupan para facilitar la operación; la limpieza se realiza con la ayuda de un raspador metálico y de jugo limpio que luego se deposita en la paila melacera.

La paila melacera se debe raspar permanentemente, debido a que la melaza se pega al fondo con mucha facilidad. Esto se puede hacer con la ayuda de un raspador sin necesidad de desocupar la paila.

Es recomendable que las hornillas operen en forma continua ya que de esta manera se evitan pérdidas de combustible por enfriamiento nocturno y deterioro del ladrillo ocasionado por cambios bruscos de temperatura. Por otra parte cuando la hornilla se opera solamente en el día, el promedio de capacidad disminuye debido al tiempo requerido en el calentamiento diario.

MANTENIMIENTO

Después de cada molienda, se debe realizar las siguientes labores de mantenimiento para garantizar un buen funcionamiento de la hornilla y prolongar su vida útil:

- Retiro de la ceniza del cenicero y del ducto
- Retiro del hollín formado en la superficie caliente de las pailas.
- Raspado de la capa de mieles pegada en el fondo de las pailas y en las falcas. Después raspar las pailas de hierro, se debe aplicar una lechada de cal para evitar la corrosión de las mismas.
- Lavado general de los pasillos de trabajo de los operarios

BIBLIOGRAFIA

1. BEDAUX M. An. Investigation on the improvement of the evaporation installations as used the traditional cane sugar industry of Colombia. Barbosa 1988. Masther's Thesis (mechanical Engineer), University of Technology Delf, Depatment of Mechanical Engineering.
2. _____ . Diseño de la cámara de Combustión. Barbosa 1.991
3. _____ . Evaluación de las hornillas paneleras en la Hoya del Río Suárez. Barbosa ,1989
4. _____ . Evaluación de pailas con aletas soldadas. Barbosa 1.989
5. _____ . Mejoramiento de la combustión en hornillas paneleras. Barbosa 1991
6. CIMPA. Convenio de Investigación para el mejoramiento de la industria panelera. Manual de caña para panela . Barbosa 1.991.
7. _____ . Manual de elaboración de panela y otros derivados de la caña. Barbosa ,1991
8. _____ . Manual para la selección, montaje y operación de los equipos de molienda para la producción de panela. Barbosa, 1991.
9. _____ . Mejoramiento de hornillas paneleras. Memorias II curso. Barbosa, 1991.
10. GARCIA H. Modelo para cálculo de presión atmosférica en función de la altura sobre el nivel del mar.
11. GORDILLO G. Desarrollo de coeficientes para la implementación de un método simplificado para el diseño de hornillas paneleras . Barbosa. 1990.
12. _____ . El proceso de combustión en hornillas paneleras. Barbosa, 1991.
13. GORDILLO G. Y SIERRA R. Determinación de la relación existente entre la humedad del bagazo, porcentaje de extracción y contenido de fibra de la caña. Barbosa, 1991.
14. _____ . Determinación de la relación existente entre la humedad del bagazo, temperatura de combustión y exceso de aire en una hornilla panelera. Informe de trabajo 1991.
15. HUGOT E. Manual para ingenieros azucareros, Cia. Editorial continental, S.A. México 1982.
16. INCROPERA F. Fundamentals of heat and Mass transfer. New York 1985. Second edition.
17. KERN D. Process heat transfer. International student edition. 1986.
18. KREITH F. Principios de Transferencia de calor. Primera edición en español International text book Company. 1976.

19. PERRILLA C. Y SIERRA R. Proceso de transferencia de calor para pailas en la industria panelera, Barbosa 1.991 Tesis (ingeniero químico). Universidad de América. Facultad de Ingeniería química.
20. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Anuario estadístico del sector agropecuario. Bogotá 1989.
21. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Boletín de estadísticas agropecuarias No. 19. Bogotá 1.987.
22. OSIZIK N. Transferencia de calor. Ed. Mcgraw Hilla. 1979.
23. PERRY R. , et al. Chemical engineers handbbook, new York. 6ª. Ed. 1985.
24. RODRIGUEZ G. La agroindustria panelera. Barbosa, 1991
25. SIERRA R. Mejoramiento de la sección de transferencia de calor en las hornillas paneleras. Informe de trabajo. 1991.
26. VDI. Warneatlaas. Dusseldorf. 1963.