

DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA PANELA EN COLOMBIA

Héctor Iván Velásquez Arredondo¹; Farid Chejne Janna² y
Andrés Felipe Agudelo Santamaría³

RESUMEN

El consumo de panela en Colombia es el más alto del mundo (CORPOICA-FEDEPANELA, 2000) y su producción una de las principales actividades agrícolas de la economía nacional. A pesar de esto, el uso de los recursos energéticos en este sector ha sido deficiente (ICA, 1986; CORPOICA, 1996). Por esto varios grupos de investigación e instituciones han propuesto diseños alternativos para los sistemas productivos de panela. En este artículo se hace una evaluación del consumo energético en estos y otros sistemas. Se desarrollan balances de masa y energía y se definen índices para diagnosticar el desempeño energético de las instalaciones.

Se encuentra que el grado de desarrollo tecnológico y el estado de la infraestructura influyen directamente sobre la eficiencia energética del proceso y que se pueden lograr mejoras considerables en el uso de la energía por medio de modificaciones sencillas y sobre todo mediante un buen diseño térmico de los sistemas, como se prueba con una hornilla de construcción reciente diseñada por uno de los autores.

Palabras Clave: Hornilla, producción de panela, balances de masa y energía, eficiencia energética.

ABSTRACT

DIAGNOSTIC ENERGY OF THE PRODUCTIVE PROCESSES OF PANELA IN COLOMBIA

Unrefined sugar consumption in Colombia is the highest in the world (CORPOICA-FEDEPANELA, 2000) and its production is one of the main agricultural activities of the national economy. In spite of this, the use of energy resources in this sector has been deficient (ICA, 1986; CORPOICA, 1996). For this reason, various research groups and institutions have proposed alternative designs for unrefined sugar production systems. This article evaluates the energetic consumption in these and other systems. Mass and energy balances are developed and indexes are defined for diagnosing energy performance of the facilities.

¹ Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. A.A. 1927, Medellín, Colombia. <hivelasq@unalmed.edu.co>

² Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía. A.A. 1927, Medellín, Colombia. <fchejne@unalmed.edu.co>

³ Investigador Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia. A. A. 1226, Medellín, Colombia. mechanikles@yahoo.com

It is shown that the degree of technological development and the state of infrastructure directly influence the energy efficiency of the process and that it is possible to considerably improve energy use by means of simple modifications, especially thorough a good thermal design of the systems, as has been shown in a recently-built oven designed by one of the authors.

Key words: Oven, unrefined sugar production, mass and energy balances, energy efficiency

Nomenclatura

°B: Grados Brix	CH: Porcentaje de formación de chachaza
c_p : Calor específico a presión constante	$\dot{E}$: Flujo de energía [kW] [kJ/kg K]
EM: Nivel de extracción del molino [%]	h : Entalpía específica [kJ/kg]
$\dot{m}$: Flujo másico [kg/s, kg/h]	n : Número de moles
p : Presión [bar]	PCI: Poder calorífico inferior [kJ/kg]
w : Humedad en el bagazo	

Caracteres griegos

ϕ : Humedad relativa	ω : Humedad absoluta [kg _v /kg _{as}]
---------------------------	--

Subíndices

a : Agua	aa : Agua en el aire
ab : Agua en el bagazo	ae : Agua evaporada
as : Aire seco	at : Agua en los gases de combustión
bar : Barométrica	bh : Bagazo húmedo
bs : Bagazo seco	ca : Caña de azúcar
ch : Cachaza	f : Agua líquida saturada
fg : Relativo a la evaporación	jc : Jugo clarificado
g : Vapor de agua saturado	gen : Generado en la combustión
gs : Gases secos de combustión	p : Panela
r : Residuos	v : Vapor de agua en el aire

INTRODUCCIÓN

En el mundo cerca de treinta países producen panela. Colombia es el segundo productor después de la India, con un volumen que representa más del 9% de la producción mundial registrada por la FAO. En términos de consumo por habitante, Colombia ocupa el primer lugar con un consumo promedio de 31 kg de panela por persona al año, cantidad que supera en más de tres veces a otros consumidores importantes (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), 2000).

La producción de panela es una de las principales actividades agrícolas de la economía nacional, entre otras razones por su participación significativa en el Producto Interno Bruto (PIB) agrícola, por la superficie dedicada al cultivo de la caña, la generación de empleo rural y su importancia en la dieta de los colombianos. En el país se estima que existen cerca de 70.000 unidades agrícolas que cultivan caña para la producción panelera y aproximadamente 15.000 trapiches en los que se elaboran panela y miel de caña (Central de Insumos y Materias Primas para la Industria Alimentaria Ltda. (CIMPA), 1992); Henao, Moreno y Olarte 1999). La mayoría de las actividades de producción se realizan dentro de esquemas de economía campesina en unidades de pequeña escala, con alto uso de mano de obra y bajos niveles de

inversión en mejoras tecnológicas. Dado el problema de ineficiencia energética (Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), 1986); CORPOICA, 1996) en muchos trapiches no basta con el bagazo producido y se emplea leña o llantas usadas como combustible adicional para suplir la demanda energética del proceso (CIMPA, 1992). La preocupación por el agotamiento de los recursos y la contaminación ambiental, ha llevado a que diferentes instituciones realicen nuevos diseños de hornillas y procesos productivos con mayores eficiencias energéticas. En este trabajo se presenta una evaluación energética basada en la primera ley de la termodinámica para algunas de las alternativas planteadas.

ANTECEDENTES

En trabajos anteriores donde se han realizado mediciones energéticas en hornillas paneleras sin ninguna modificación tecnológica se encuentran los siguientes resultados: la eficiencia térmica de las hornillas oscila entre el 15 y 30%, las pérdidas por chimenea son del 70 al 90%, la temperatura de salida de los gases de combustión está entre 450 y 700 °C, los porcentajes de exceso de aire son menores del 20% o mayores del 100%. (ICA Y Federación de Cafeteros (FEDECAFE), 1986). En evaluaciones realizadas una década después, se encuentran los siguientes resultados: las pérdidas por chimenea son del 30%, la temperatura de salida de los gases de combustión son cercanas a 700°C, la formación de CO alcanza un valor promedio de 10%, las pérdidas por las paredes son del 7%, y una eficiencia térmica promedio del 20 al 25% (CORPOICA, 1996).

METODOLOGÍA

Se toma una muestra de una docena de trapiches en varias regiones del país que recoge hornillas tradicionales y aquellas que se han intervenido tecnológicamente, además se estudian procesos productivos de panela con principios tecnológicos diferentes a las hornillas. Para cubrir la variedad de procesos productivos se han seleccionado una hornilla tradicional antigua, una de construcción reciente, 4 con modificaciones tecnológicas, y 2 trapiches con proceso productivo diferente (con vapor). En la Tabla 1 se presentan los trapiches estudiados con sus principales características.

Para realizar los cálculos necesarios se hicieron mediciones de flujos másicos de caña procesada, bagazo, panela y cachaza producida; condiciones ambientales: presión barométrica, humedad relativa y temperatura ambiente; temperaturas de entrada del jugo clarificado, agua evaporada, punto de panela y cachaza producida; composición y temperatura de los gases de combustión; presión estática y de velocidad en la chimenea (Seymour, 1971); grados Brix del jugo de la caña y la panela, y algunas pruebas de laboratorio realizadas en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional sede Medellín tales como: humedad, composición elemental, poder calorífico del bagazo, y pruebas de no quemados en las cenizas. El poder calorífico se confrontó con estándares internacionales (Sugar Engineers' Library, 2004).

Tabla 1. Trapiches evaluados en el diagnóstico de los procesos productivos de panela en Colombia.

Designación	Tipo de trapiche	Características
T1	Tradicional antiguo	Hornilla en flujo paralelo. Construido a principios del siglo XX, característico de Antioquia. Funciona con criterios más artesanales que industriales.
T2	Tradicional recién construido	Hornilla en flujo paralelo construida en 1998 con criterios industriales.
T3	Tradicional tipo Cimpa	Hornilla en contraflujo diseñada por el “CIMPA”.
T4	Tradicional con dos bocas de alimentación	Hornilla en contraflujo no convencional diseñada y construida por “CORPOICA” en el año 2000.
T5	Tradicional con soplador	Hornilla tradicional en contraflujo con ventilador en la entrada (soplador) para originar un tiro forzado en el aire de alimentación.
T6	Trapiche Gipun	Hornilla en contraflujo diseñada por el “GIPUN”.
T7	Proceso con vapor	Proceso manejado con criterios industriales, utiliza el vapor de agua generado en calderas como fuente energética para la evaporación del jugo de caña.
T8	De triple efecto	Proceso manejado con criterios industriales, utiliza el vapor de agua generado en calderas como fuente energética con evaporación al vacío del jugo de caña.

MODELO PARA EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE LOS TRAPICHES

Para evaluar y comparar el funcionamiento energético de los trapiches es necesario realizar los balances de masa y energía en los procesos productivos (Jones y Dugan, 1997).

Balance de masa. En el balance másico de la combustión se considera que entran bagazo húmedo y aire a la cámara de combustión y salen gases de combustión y residuos. En el proceso productivo se considera que entra jugo de caña clarificado y salen vapor de agua, panela y cachaza (Figura 1).

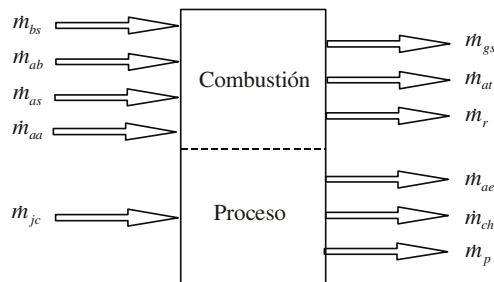


Figura 1. Flujos másicos a través del sistema, durante la producción de panela.

La ecuación de conservación de masa en el proceso de combustión será:

$$\dot{m}_{bs} + \dot{m}_{ab} + \dot{m}_{as} + \dot{m}_{aa} = \dot{m}_{gs} + \dot{m}_{at} + \dot{m}_r \quad (1)$$

En esta expresión los flujos másicos de izquierda a derecha corresponden a bagazo seco, agua en el bagazo, aire seco, agua en el aire, gases de combustión secos, agua en los gases y residuos.

El flujo másico de agua en el bagazo $\dot{m}_{ab}$, se obtiene de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{bs} = \dot{m}_{bh}(1 - w) \quad (2)$$

Donde w es la humedad en el bagazo y el subíndice bh se refiere al bagazo húmedo.

El flujo másico del aire seco se calcula a partir del análisis Orsat de los gases de combustión y de la composición elemental del bagazo seco determinada experimentalmente

$$(C_{3.73}H_{6.3}O_{2.98}N_{0.00129})$$

Como el bagazo prácticamente no contiene nitrógeno, se asume que todo el nitrógeno presente en los gases de combustión proviene del aire atmosférico. Esto permite también conocer la cantidad de oxígeno en el aire:

$$(O_2)_{aire} = (n_{N_2})_{gases} \times \frac{0.21}{0.79} \quad (3)$$

por lo tanto:

$$\dot{m}_{as} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2} \quad (4)$$

La humedad del aire se puede determinar a partir de las mediciones de temperatura ambiente y humedad relativa. La humedad absoluta se puede calcular como (Wark, 2001):

$$\omega = \left(\frac{18}{29} \right) \left(\frac{p_v}{p_{bar} - p_v} \right) \quad (5)$$

Donde: $p_v = \phi \times p_g$

El subíndice bar significa barométrica, v se refiere al vapor de agua en el aire, y g al vapor de agua saturado en las condiciones del aire. ϕ es la humedad relativa. El flujo másico de agua en el aire es:

$$\dot{m}_{aa} = \omega \cdot \dot{m}_{as} \quad (6)$$

El flujo másico de los residuos, $\dot{m}_r$, es la cantidad de cenizas presentes en el bagazo, calculadas a partir de la composición elemental del mismo y el porcentaje de no quemados presentes en los residuos. Como observación general se nota que el nivel de no quemados presentes en la mayoría de los trapiches es muy bajo y en algunos casos se puede despreciar.

El flujo de agua presente en los gases de combustión es:

$$\dot{m}_{at} = \dot{m}_{ab} + \dot{m}_{aa} + \dot{m}_{a,gen} \quad (7)$$

El subíndice a,gen se refiere al agua generada en la combustión del hidrógeno. El flujo de gases secos se determina a partir del balance de masa:

$$\dot{m}_{gs} = \dot{m}_{bs} + \dot{m}_{ab} + \dot{m}_{as} + \dot{m}_{aa} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{at}) \quad (8)$$

El flujo de jugo de caña de azúcar se calcula a partir de mediciones con base en la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{jc} = \frac{\dot{m}_{ca}(EM - CH)}{100} \quad (9)$$

EM es el nivel de extracción del molino (en porcentaje) y CH es el porcentaje de formación de cachaza, tomado como el 3% (Hugot, 1974). El subíndice jc se refiere al jugo clarificado y ca a la caña.

La panela producida se calcula con la siguiente relación:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{jc} \cdot {}^\circ B_{jc}}{{}^\circ B_p} \quad (10)$$

Donde ${}^\circ B$ son los grados Brix y el subíndice p se refiere a la panela.

Balance de energía. Aplicando la primera ley de la termodinámica en estado estacionario (Figura 2) se puede plantear una ecuación de balance de energía de la siguiente manera:

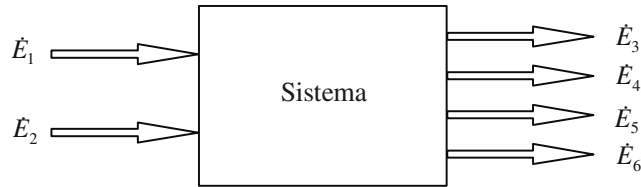


Figura 2. Flujos energéticos a través del sistema, en la producción de panela.

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_5 + \dot{E}_6 \quad (11)$$

El flujo de energía que acompaña al bagazo se calcula como (Chejne, 2000):

$$\dot{E}_1 = \dot{m}_{bs} \cdot PCI + \dot{m}_{ab} \cdot h_f \quad (12)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del bagazo seco y h_f es la entalpía del agua que entra con el bagazo, que se aproxima como la de líquido saturado a temperatura ambiente.

El flujo de energía con el aire para la combustión se obtiene como:

$$\dot{E}_2 = \sum_i \dot{m}_i \cdot h_i \quad (13)$$

Con $i = N_2, O_2, aa$.

El flujo energético asociado a los gases en la chimenea es:

$$\dot{E}_3 = \sum_k \dot{m}_k \cdot h_k \quad (14)$$

Con $k = CO_2, N_2, O_2, CO, at$.

En el proceso los residuos se retiran de la cámara de combustión cuando están a temperatura ambiente, por lo que no aportan energía en el balance global ($\dot{E}_4 = 0$).

El flujo energético aprovechado en el proceso se calcula como:

$$\dot{E}_5 = \sum_j \dot{m}_j \cdot c_{p,j} \cdot \Delta T_j + \dot{m}_{ae} \cdot h_{fg} \quad (15)$$

Con $j = ae, p, ch$

El término h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua. El subíndice ae se refiere al agua evaporada del jugo de la caña y ch a la cachaza. Las diferencias de temperatura son las temperaturas de salida del agua evaporada, panela y cachaza con referencia a la temperatura de entrada del jugo de caña.

Las pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes no se calculan directamente, sino que se obtienen a partir del balance de energía:

$$\dot{E}_6 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 - (\dot{E}_3 + \dot{E}_5) \quad (16)$$

Usando las ecuaciones 12 a 16, el balance de energía, ecuación 11, se puede desarrollar como:

$$\dot{m}_{bs} \cdot PCI + \dot{m}_{ab} \cdot h_f + \sum_i \dot{m}_i \cdot h_i = \sum_k \dot{m}_k \cdot h_k + \sum_j \dot{m}_j \cdot c_j \cdot \Delta T_j + \dot{m}_{ae} \cdot h_{fg} + \dot{E}_6 \quad (17)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para diagnosticar el funcionamiento de los 8 trapiches estudiados se han definido varios índices que dan cuenta de la forma en que emplean los recursos. El primero es un indicador del rendimiento del cultivo y se define como el cociente entre la panela producida y la caña procesada.

$$I_1 = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{ca}} \quad (18)$$

Sus resultados se pueden observar en la Figura 3.

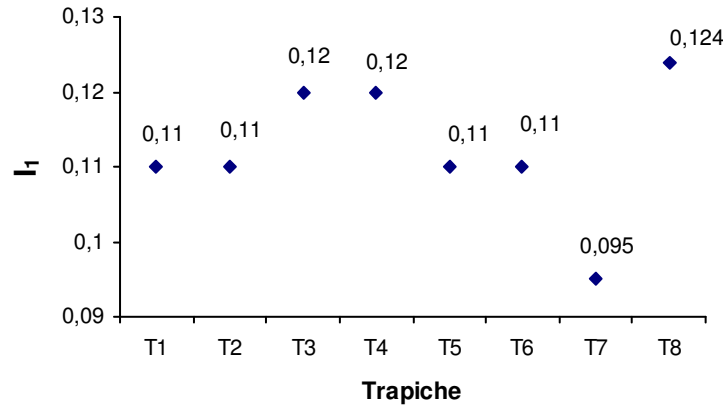


Figura 3. Índice de productividad de los trapiches empleados para la elaboración de panela en Colombia.

Este parámetro tradicionalmente ha tenido un valor de 0.1 (10%) (CORPOICA-FEDEPANELA, 2000), superado por la mayoría de los trapiches objeto de estudio. El aumento en la productividad del cultivo se debe en parte al uso de abonos. El trapiche T7 que usa como tecnología el vapor es un caso especial con un índice bajo (9.5%), debido a que en él se produce panela ecológica y no se utilizan fertilizantes químicos en los cultivos (Durán)⁴. En este caso se sacrifica el rendimiento para obtener un producto de óptima calidad comercializado a mejor precio.

En los trapiches se busca el autoabastecimiento energético mediante el uso del bagazo como combustible, por lo tanto se define un índice que da cuenta del bagazo sobrante o faltante en los trapiches. Como la humedad con que se produce y se consume el bagazo varía con el nivel de extracción de jugo y el proceso de secado, la cantidad de bagazo húmedo no ofrece una comparación directa de los trapiches. Por esto se define el índice con base en el bagazo seco consumido y producido:

$$I_2 = \frac{\dot{m}_{bs, producido} - \dot{m}_{bs, consumido}}{\dot{m}_{bs, producido}} \times 100\% \quad (19)$$

Sus resultados se pueden observar en la Figura 4.

⁴ ENTREVISTA CON Néstor Durán, Director del Departamento de Investigaciones de Fedepanela. Bugalagrande (Valle). Octubre 18, 2002.

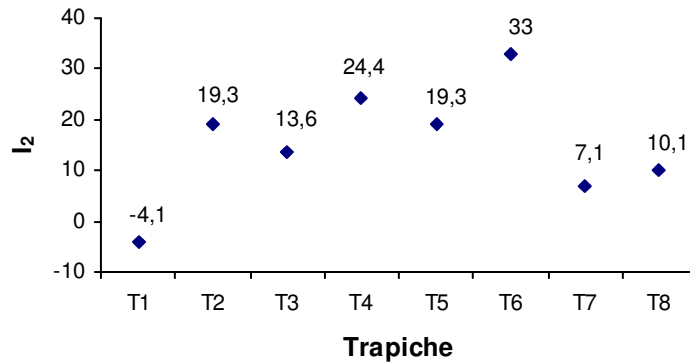


Figura 4. Índice de bagazo sobrante (%) en los trapiches durante la producción de panela en Colombia.

Se observa como todos los cambios tecnológicos incorporados en las hornillas son positivos teniendo como resultado el objetivo propuesto de autosuficiencia energética. Resulta también evidente la necesidad de usar combustibles adicionales en los trapiches tradicionales típicos. El trapiche T1 es el único en que la energía del bagazo no es suficiente para la producción de panela, presentando un defecto del 4,1% en el bagazo necesario para que la hornilla sea autosuficiente.

Un índice de suma importancia para diagnosticar el funcionamiento de los trapiches es su eficiencia energética, que se define como el cociente entre la energía aprovechada y la energía del combustible.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{ae} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_p}{m_{bs} \cdot PCI + m_{ab} \cdot h_f} \quad (20)$$

En la Figura 5 se muestra el valor de este índice para los diferentes trapiches.

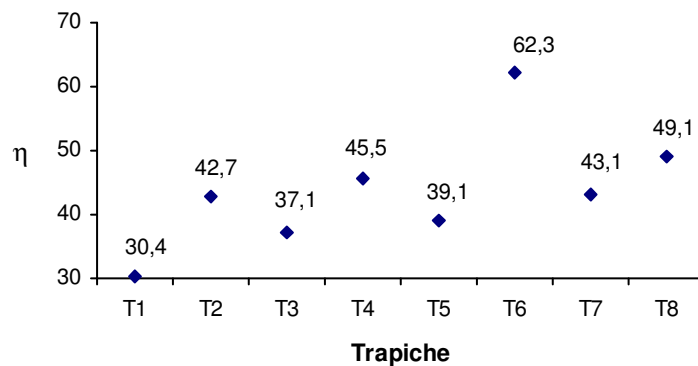


Figura 5. Eficiencia energética de los trapiches utilizados para la producción de panela en Colombia.

Se observa la baja eficiencia del trapiche tradicional (T1), lo que concuerda con los valores de mediciones anteriores (ICA, 1986; CORPOICA, 1996) y cómo los cambios tecnológicos involucrados han incrementado la eficiencia energética.

Para determinar que porcentaje de la energía que se pierde en los gases de combustión, se define el siguiente índice:

$$I_3 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}} \quad (21)$$

El flujo energético de la corriente de gases es el producto de su flujo másico y su entalpía específica, por lo que su valor depende tanto del exceso de aire como de la temperatura de los gases en la chimenea. Sus valores pueden observarse en la Figura 6.

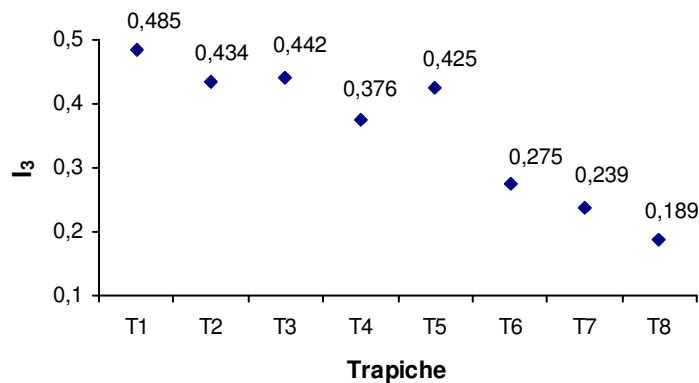


Figura 6. Índices de pérdidas en gases de combustión para los trapiches usados para la producción de panela en Colombia.

Son excesivas las pérdidas energéticas con los gases de combustión de los trapiche T1 a T5 que reflejan los problemas de diseño en la cámara de combustión y la zona de transferencia de calor de las hornillas. Estas pérdidas son inapropiadas para cualquier proceso industrial.

En la Figura 7 se presentan la temperatura y el exceso de aire de los gases de combustión. Valores altos en la temperatura de los gases asociados con altos excesos de aire redundan en el gran flujo energético que se pierde por la chimenea.

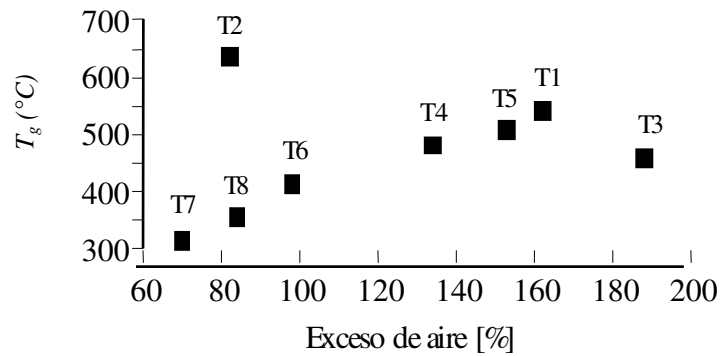


Figura 7. Temperatura de gases y exceso de aire en los trapiches empleados para la producción de panela en Colombia.

Los trapiches T7 y T8 presentan las menores temperaturas y excesos de aire, aunque éstos siguen estando por encima de lo recomendado para el bagazo de caña (Hugot, 1974).

Otro indicador de la forma como se utiliza la energía del combustible es el siguiente:

$$I_4 = \frac{\dot{E}_{p\acute{e}rdidas}}{\dot{E}_{suministrada}} \quad (22)$$

El numerador en el índice 4 es la suma de las pérdidas por paredes y la energía de las cenizas, siendo el aporte de las cenizas despreciable, sus resultados se pueden observar en la Figura 8.

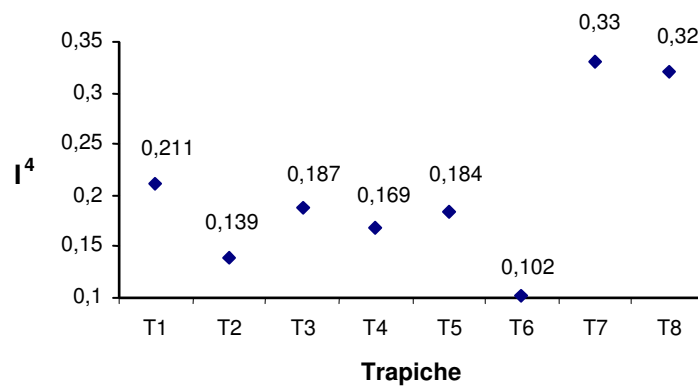


Figura 8. Índices de pérdidas de energía por las paredes de las hornillas en los trapiches usados para la producción de panela en Colombia.

El índice de pérdidas por paredes refleja como las hornillas al construirse enterradas tienen menos pérdidas que los procesos con vapor, donde por falta de un buen aislamiento térmico las pérdidas son mayores. No concuerdan estos resultados con los reportados en los antecedentes a este trabajo (CORPOICA, 1996).

Finalmente se define un índice que da cuenta del rendimiento global de los trapiches, calculado como el cociente entre el bagazo seco consumido y la panela producida:

$$I_5 = \frac{\dot{m}_{bs,consumido}}{\dot{m}_p} \quad (23)$$

El valor del índice 5 depende del éxito en la extracción de jugos, en el secado del bagazo (en caso de que se realice), en el proceso de combustión, y en el aprovechamiento de la energía en el proceso productivo. En la Figura 9 se muestra su valor para los 8 trapiches.

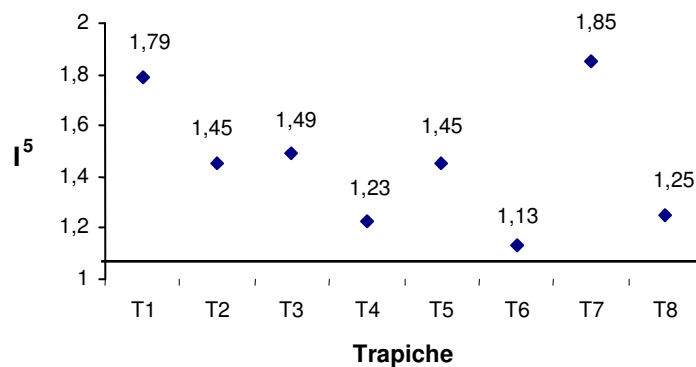


Figura 9. Índice global del rendimiento de los trapiches empleados para la producción de panela en Colombia.

Entre más bajo sea este índice, mejor será el rendimiento global (energético y productivo) del trapiche. Los valores más altos los tienen los trapiches T1 y T7, lo que es de esperarse debido a la baja eficiencia energética del trapiche tradicional y a la falta de organización en su proceso productivo y al bajo rendimiento de cultivo y altas pérdidas por paredes del trapiche a vapor. El mejor comportamiento lo presenta el trapiche GIPUN, que combina un diseño mejorado de la hornilla con un secado del bagazo en pequeños arrumes esparcidos en un planchón, obteniendo así bajos niveles de humedad en el bagazo utilizado.

CONCLUSIONES

Las pérdidas por paredes constituyen una fracción considerable de la energía empleada en el proceso, principalmente en el trapiche tradicional y los procesos con vapor.

A pesar de las mejoras tecnológicas sigue existiendo un alto potencial energético en los gases de combustión debido a las altas temperaturas de los gases en la chimenea y a los excesos de aire elevados.

La aplicación de principios de ingeniería al diseño térmico de las hornillas puede incrementar significativamente la eficiencia y la autonomía energéticas de los trapiches, como lo demuestra el comportamiento del trapiche GIPUN.

En los procesos productivos en los cuales se han hecho mejoras tecnológicas se logra aumentar la eficiencia energética de tal forma que se cumple el objetivo principal de autoabastecimiento energético de los trapiches.

El desempeño global de los trapiches se ve significativamente mejorado con el nivel de las modificaciones tecnológicas, a excepción del proceso con vapor que sacrifica la productividad por la calidad y exclusividad de su producto.

Con respecto a estudios anteriores se observa un claro aumento de la eficiencia energética y una disminución significativa en las pérdidas por chimenea, mientras que se obtuvo un mayor nivel de pérdidas por paredes que el reportado hasta el momento.

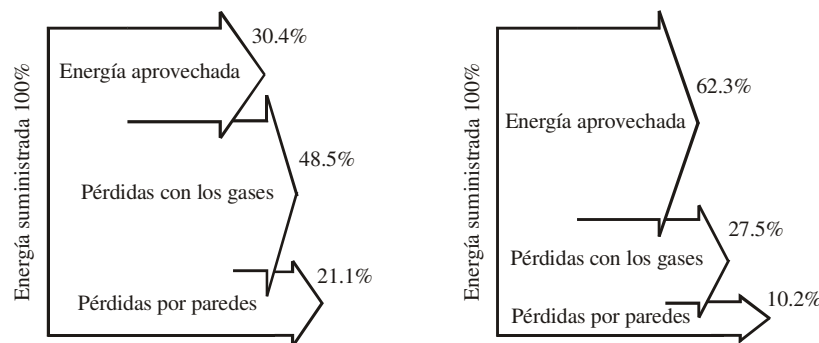


Figura 10. Balances de energía para los trapiches T1 y T6 empleados para la producción de panela en Colombia.

En la Figura 10 se presentan los resultados del balance energético para el trapiche tradicional sin modificaciones y el trapiche GIPUN. Se observa la ventaja del trapiche GIPUN en cuanto a distribución del recurso energético, eficiencia que se traduce en mayor productividad.

BIBLIOGRAFÍA

CENTRAL DE INSUMOS Y MATERIAS PRIMAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA LTDA. Manual para la elaboración de panela y otros derivados de la caña. Barbosa: CIMPA, 1992. 29 p.

CHEJNE JANNA, Farid. Termodinámica básica. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. 2000. 333 p.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. Artículos técnicos sobre el cultivo de la caña y la elaboración de panela. Santander: CORPOICA, 1996. 22 p.

_____. Manual de caña de azúcar para la producción de panela. Palmira: Fedepanela, 2000. 24 p.

_____ y FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE PANELA. Manual de caña de azúcar para la producción de panela. Bucaramanga: CORPOICA, 2000. p. 154.

DOOLITTLE, J. Seymour El laboratorio del Ingeniero Mecánico. 2ed. Buenos Aires: Hispanoamericana, 1971. 347 p.

HENAO R., Carlos, MORENO, Rocío y OLARTE, Gilberto. La panela, una agroindustria que se consolida. Bogotá: Fondo Nacional de Fomento Panelero, 1999. 30 p.

HUGOT, E. Manual para ingenios azucareros. 5 ed. México: Continental, 1974. 803 p.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Curso de caña y elaboración de la panela. Santander: CIMPA, 1986. p. 156.

_____ y FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Producción de caña y elaboración de la panela. Bogotá: ICA, 1986. 233 p. (Compendio No. 45).

JONES, J B. y DUGAN, R E. Ingeniería termodinámica. Estados Unidos: Prentice Hall, 1997. 1000 p.

SUGAR ENGINEERS' LIBRARY. Mass and energy balance calculations of sugar. Internet: www.sugartech.co.za (Octubre de 2004].

WARK, K. y RICHARDS, D. Termodinámica. 6 ed. México, D.F.: Mc-Graw Hill, 2001. 905 p.