

Diagnóstico exergético de los procesos productivos de la panela en Colombia

Héctor I. Velásquez ¹, Farid C. Janna ², Andrés F. Agudelo ³

Recibido para evaluación: 7 de Junio de 2005
Aceptación: 23 de Septiembre de 2005
Entrega de versión final: 27 de Febrero de 2006

Resumen

El consumo de panela en Colombia es el más alto del mundo 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, llevando al uso combustibles adicionales al bagazo, como madera y llantas para compensar las deficiencias energéticas (Velásquez et al., 2004). Esto ha generado propuestas de diseño alternativos para los sistemas productivos de panela, que hasta ahora se han basado en criterios energéticos, sin tener en cuenta la calidad de las diferentes formas de energía que participan de los procesos.

En este artículo se hace un análisis exergético de los diseños de trapiches más representativos. Se encontró que a pesar de obtener mejoras considerables en la eficiencia energética al introducir modificaciones tecnológicas (Velásquez et al., 2004), no sucede lo mismo con la eficiencia exergética, la cual es significativamente baja para todos los sistemas analizados. Este resultado es de esperarse, ya que en el proceso se emplea energía térmica a baja temperatura, condición impuesta por la evaporación del agua del jugo de caña.

Palabras Claves: Hornilla, Trapiche, Producción de panela, Análisis exergético.

Abstract

A Unrefined sugar consumption in Colombia is the greatest in the world and its production is one of the main agricultural activities of national economy. In spite of this, the use of energy resources in this sector has been inefficient, causing the need to use additional fuels to bagaze, such as wood and rubber for compensating the energy inefficiency (Velásquez et al., 2004). For this reason alternative design proposals have emerged for unrefined sugar productive systems, which have been based in energy considerations, without counting on the quality of the different energy forms involved in the processes.

In this work an exergy analysis of the more representative sugar mills desingns is developed. It has been found that although significant improvement in energy efficiency is observed by introducing technologycal modifications (Velásquez et al., 2004), it hasn't happened the same with the exergy efficiency, which is significantly low for all the systems analyzed. This result is to be expected, because in the process low temperature thermal energy is used, condition imposed by the sugar cane juice evaporation.

Keywords: Oven, Sugar Mill, Unrefined sugar production, Exergy analysis.

© 2006 Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Todos los derechos reservados.

¹Profesor de la Escuela de Procesos y Energía, Instituto de Energía, Universidad Nacional de Colombia. email: hivelasq@unalmed.edu.co

²Profesor de la Escuela de Procesos y Energía, Instituto de Energía, Universidad Nacional de Colombia. email: fchejne@unalmed.edu.co

³Estudiante de Maestría en Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Universidad de Antioquia. email: afagudel@udea.edu.co

c_p	Calor específico a presión constante [kJ/kg K]
ex	Exergía específica [kJ/kg]
$\dot{E}x$	Flujo de exergía [kW]
h	Entalpía específica [kJ/kg]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s, kg/h]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
R	Constante de gas [kJ/kg K]
s	Entropía específica [kJ/kg K]
T	Temperatura [K]
x	Fracción másica
Y	Fracción molar

Caracteres griegos

\mathcal{E}	Eficiencia exergética
---------------	-----------------------

Subíndices

0	Condiciones del ambiente
ae	Agua evaporada
bs	Bagazo seco
C	Carbono, Asociado a la combustión
$cond$	Condensados
dc	Destruída en la combustión o en la caldera
dp	Destruída en el proceso de evaporación del jugo
gc	Gases de combustión
gch	Gases de chimenea
H	Hidrógeno
jc	Jugo de caña
N	Nitrógeno
O	Oxígeno
p	Panela
sac	Sacarosa
v	Vapor producido en la caldera

Superíndices

amb	Ambiente
F	Física
Q	Química

1. 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 (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 (CIMPA, 1992; Henao et al., 1999). 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 (Velásquez et al., 2004), pero no existen trabajos que incluyan el análisis exergético. En este trabajo se emplea dicho análisis para diagnosticar algunas de las alternativas planteadas.

A diferencia de los análisis energéticos tradicionales, en el análisis exergético siempre hay presente un término de consumo que da cuenta de las irreversibilidades de los procesos (Rosen, 1999). Por esto, es de gran valor en el estudio de sistemas de transformación de energía, ya que permite determinar la localización, el tipo y la verdadera magnitud de las pérdidas (Gaggioli and Petit, 1977; Moran and Scuibba, 1994; Dincer and Cengel, 2001). La exergía es una herramienta esencial para determinar el impacto del uso de recursos energéticos sobre el ambiente y un elemento clave para llegar al desarrollo sostenible (Lozano et al, 1993; Dincer and Cengel, 2001).

Antecedentes

Hasta el momento en nuestro país solo se han realizado algunos estudios orientados al diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela (ICA-FEDECAFE, 1986; CORPOICA, 1996; Velásquez et al., 2005), pero con enfoque exergético solo se ha hecho un trabajo (Velásquez, 2002). En éste se construye un primer modelo para el diagnóstico exergético de los trapiches y evalúan diferentes tecnologías de producción. No se tiene conocimiento de trabajos semejantes a nivel internacional.

2. Metodología

Se toma una muestra de una docena de trapiches en

Tabla 1. Trapiches evaluados

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 el mismo principio de una tradicional, pero en mejor estado.
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.

varias regiones del país, de la cual se seleccionan 8 trapiches a saber: dos hornillas tradicionales, 4 con modificaciones tecnológicas, y 2 trapiches con diferente tecnología de producción. En la tabla 1 se presentan los trapiches estudiados con sus principales características.

Para realizar los balances necesarios se hicieron mediciones de flujos máscicos de caña procesada, bagazo, y panela producida; condiciones ambientales: presión barométrica, humedad relativa y temperatura ambiente; temperaturas de entrada del jugo clarificado, agua evaporada, temperatura final de panela; composición y temperatura de los gases de combustión en la cámara de combustión u hogar y en la chimenea; 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)

2.1 Modelo Termodinámico

Para realizar el diagnóstico exergético de los trapiches es necesario realizar los balances de masa, energía y exergía en los procesos productivos (Rosen, 1999; Dincer and Cengel, 2001). Los balances de masa y energía del sistema se presentan en una publicación anterior (Velásquez et al., 2004).

2.2 Balances de exergía

Los procesos productivos se pueden dividir en dos partes: procesos con hornillas y procesos con producción de vapor. En las hornillas los gases calientes producidos en las cámaras de combustión se emplean directamente en la evaporación del agua del jugo de caña, mientras que en los procesos con vapor el bagazo se quema en calderas y el vapor producido se utiliza para evaporar el agua del jugo por medio de intercambiadores de calor.

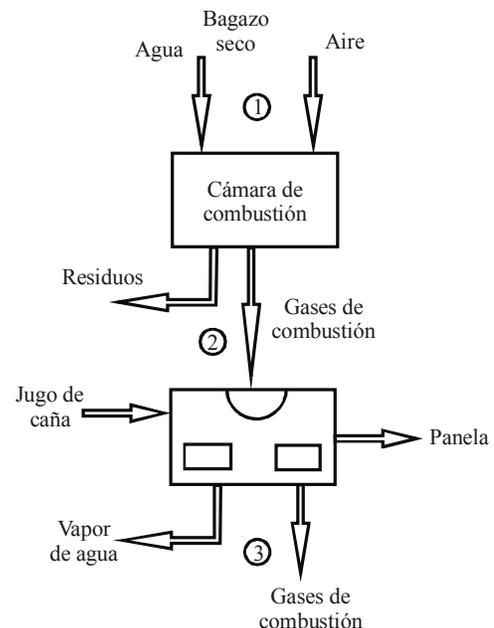


Figura 1. Esquema para el balance de las hornillas

2.2.1. Hornillas

Éstas se dividen en la cámara de combustión y la zona de evaporación del jugo. En la figura 1 se presenta un esquema de las hornillas con los flujos involucrados.

A la cámara de combustión entran bagazo húmedo y aire a condiciones atmosféricas. De ésta salen gases de combustión más la exergía destruida en el proceso. Las exergías físicas del bagazo, de la humedad en éste, y del aire se toman como cero ya que están a condiciones ambientales, de modo que solo se considera su componente química. En todos los casos se desprecia la exergía de los residuos por su bajo flujo másico y nivel energético. El aire y el agua no tienen exergía química ya que son sustancias que forman parte del ambiente. Por lo tanto, el balance exergético del hogar se reduce a:

$$\dot{E}x_{bs} = \dot{E}x_{gc} + \dot{E}x_{dc} \quad (1)$$

El flujo exergético asociado al bagazo seco es el producto de su flujo másico por su exergía química, la cual se determina a partir de la relación (Kotas, 1995):

$$\frac{\dot{E}x_{bs}}{PCI} = \frac{m_{bs} \cdot ex_{bs}^Q}{1 - 0.3035 \frac{x_O}{x_C}} \left[\begin{array}{l} 1.0438 + 1.882 \frac{x_H}{x_C} - 0.2509 \left(1 + 0.7256 \frac{x_H}{x_C} \right) \\ + 0.0383 \frac{x_N}{x_C} \end{array} \right] \quad (2)$$

Las mediciones realizadas muestran niveles muy bajos de CO, por lo que es válido asumir combustión completa. Por esto, los productos de combustión serán especies presentes en el ambiente (O₂, CO₂, H₂O, N₂). Debido a las diferencias de concentración con el ambiente, los gases tienen una componente de exergía química, de esto se deriva que el flujo exergético de los gases de combustión sea:

$$\dot{E}x_{gc} = \dot{m}_{gc} (ex^F + ex^Q)_{gc} \quad (3)$$

Donde la exergía física es (Moran and Scuibba, 1994; Kotas, 1995):

$$ex^F = \sum_j (h_j - h_{0,j}) - T_0 \sum_j (s_j - s_{0,j}) \quad (4)$$

Y la exergía química está dada por:

$$ex^Q = R_{gc} T_0 \sum_j Y_j \ln \left(\frac{Y_j}{Y_j^{amb}} \right) \quad (5)$$

con $j = CO_2, N_2, O_2, H_2O$

A la zona de evaporación de jugos, o zona de proceso entran los gases procedentes del hogar y el jugo de caña, saliendo el agua evaporada del jugo, la panela, los gases de chimenea y la exergía destruida en el proceso:

$$\dot{E}x_{gc} + \dot{E}x_{jc} = \dot{E}x_{gch} + \dot{E}x_{ae} + \dot{E}x_p + \dot{E}x_{dp} \quad (6)$$

El jugo de caña entra a condiciones ambientales, por lo que su exergía física es cero. Se considera que éste es una solución ideal de agua y sacarosa, y que la sacarosa no participa en reacciones químicas durante el proceso de evaporación, por lo que su exergía química se puede tomar con referencia a un ambiente hipotético (Guallar and Valero, 1988), dando un valor de 7.06 kJ/kg, mucho menor que el correspondiente al cambio de energía libre de Gibbs de la reacción de formación (Kotas, 1995). La exergía química del jugo será:

$$ex_{jc}^Q = (X_{H_2O})_{jc} \cdot ex_{H_2O}^Q + (X_{sac})_{jc} \cdot ex_{sac}^Q \quad (7)$$

La composición del jugo se determina a partir de sus grados Brix. El flujo exergético asociado al jugo de caña se obtiene multiplicando la expresión anterior por el flujo másico de éste. El flujo exergético de los gases de chimenea se calcula de forma similar que el de los gases de combustión (ecuación 3). El flujo exergético del agua evaporada será:

$$\dot{E}x_{ae} = \dot{m}_{ae} (ex^F + ex^Q)_{ae} \quad (8)$$

Donde la exergía física se calcula como:

$$ex_{ae}^F = (h - h_0)_{ae} - T_0 (s - s_0)_{ae} \quad (9)$$

En esta expresión la entalpía y entropía se evalúan a la presión atmosférica considerando el agua como vapor saturado seco. Debido a que el agua está en fase vapor y se difunde en el aire, tiene exergía química que se puede calcular como (Kotas, 1995):

$$ex_{ae}^Q = -R_{H_2O} \cdot T_0 \ln(Y_{H_2O}^{amb}) \quad (10)$$

El flujo exergético de panela se calcula como el producto de su flujo másico por su exergía específica, la cual tiene componentes física y química. La componente física se calcula como:

$$ex_p^F = c_p (T_p - T_0) - T_0 \cdot c_p \ln \left(\frac{T_p}{T_0} \right) \quad (11)$$

La exergía química de la panela se calcula de forma similar que para el jugo de caña (ecuación 7)

2.2.2. Procesos con vapor

Para analizar estos procesos el sistema se divide en dos partes: la caldera y la zona de proceso. El proceso con vapor tiene la particularidad que los condensados drenan por gravedad a la caldera sin que existan válvula de expansión y bomba como en el proceso de triple efecto (ver figuras 2 y 3).

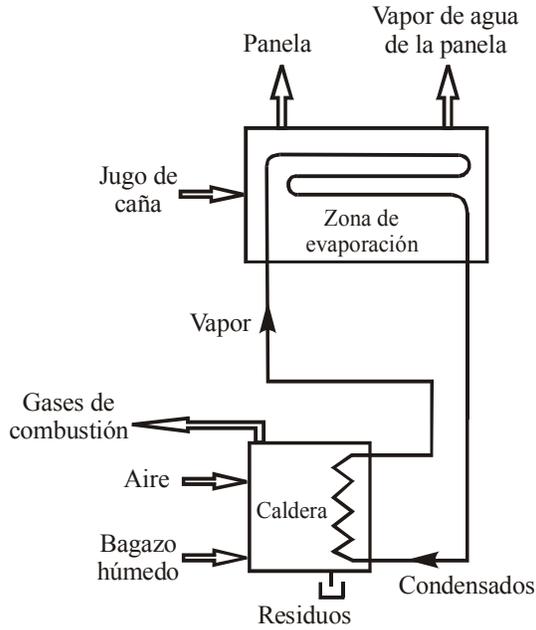


Figura 2. Esquema para el balance del proceso con vapor

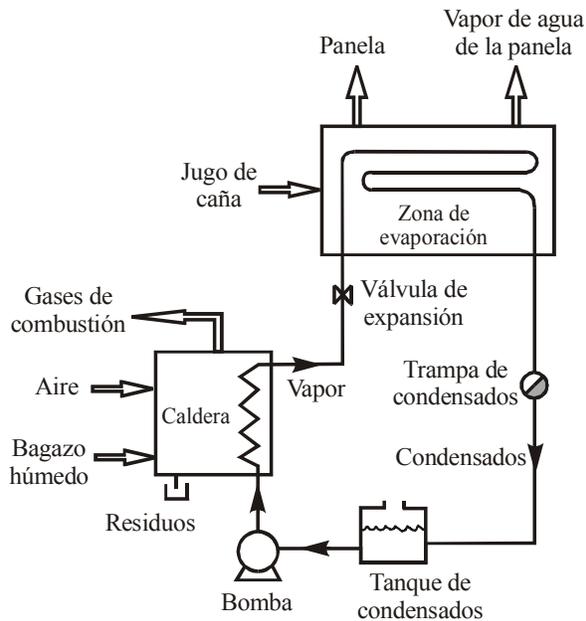


Figura 3. Esquema para el balance del proceso con vapor y triple efecto

A la caldera entran bagazo húmedo, aire y condensados, saliendo residuos, gases de combustión, vapor y la exergía destruida en el proceso. Teniendo en cuenta las mismas consideraciones que en los balances anteriores en lo referente al agua, el aire, etc., el balance exergético de la caldera será:

$$\dot{E}x_{bs} + \dot{E}x_{cond} + W_{bomba} = \dot{E}x_{gch} + \dot{E}x_v + \dot{E}x_{dc} \quad (12)$$

Los flujos exergéticos del bagazo seco, los gases de chimenea, los condensados y el vapor, se calculan de forma similar a como se hizo antes (ecuaciones 1, 3 y 9, respectivamente). El trabajo de bomba solo existe en el proceso de triple efecto, que se calcula a partir de un balance de energía considerando una eficiencia del 60% para la bomba.

La válvula de expansión en el trapiche de triple efecto se ha incluido en el balance del proceso. La ecuación de balance para el proceso será:

$$\dot{E}x_v + \dot{E}x_{jc} = \dot{E}x_{ae} + \dot{E}x_p + \dot{E}x_{cond} + \dot{E}x_{dp} \quad (13)$$

Todos los términos de esta ecuación se calculan del mismo modo que se hizo antes.

3. Resultados y discusión

3.1. Eficiencia asociada con la combustión

La eficiencia exergética de la cámara de combustión de las hornillas se define como la relación de la exergía de los gases de combustión a la exergía del bagazo suministrado:

$$\epsilon_c = \frac{\dot{E}x_{gc}}{\dot{E}x_{bs}} \quad (14)$$

En el caso de los procesos con vapor, la eficiencia exergética de la caldera se define a partir de la exergía del vapor producido y de los flujos suministrados, que son el bagazo y los condensados:

$$\epsilon_c = \frac{\dot{E}x_v}{\dot{E}x_{bs} + \dot{E}x_{cond}} \quad (15)$$

En la figura 4 se presentan las eficiencias de combustión de los trapiches.

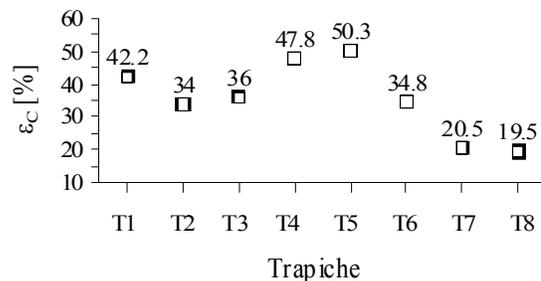


Figura 4. Eficiencia asociada con la combustión.

El comportamiento de la eficiencia exergética de la cámara de combustión se debe a factores tales como: la forma como se quema el combustible, el mezclado de éste con el aire, la temperatura de la cámara de combustión, el flujo de gases y la humedad del combustible, entre otros.

Debido a esto no se puede concluir con seguridad sobre el comportamiento de esta eficiencia.

Los trapiches que emplean vapor para el proceso tienen las menores eficiencias exergéticas, debido a que las temperaturas en la cámara de combustión de la caldera son menores dado que se quema bagazo húmedo, y además, en estos trapiches los gases de combustión se emplean para producir vapor en vez de usarse directamente en la producción de panela, lo cual introduce una fuente de irreversibilidades adicional.

3.2. Eficiencia del proceso

En el proceso se evapora el agua del jugo de caña y se produce la panela. En términos exergéticos, el producto del proceso se compone de la exergía del agua evaporada y la de la panela. En el caso de las hornillas, el recurso son los gases de combustión más la del jugo de caña, mientras que en los procesos con vapor es el vapor producido en la caldera más el jugo. Para las hornillas se tiene:

$$\epsilon_p = \frac{\dot{E}x_{ae} + \dot{E}x_p}{\dot{E}x_{gc} + \dot{E}x_{jc}} \quad (16)$$

Para los procesos con vapor:

$$\epsilon_p = \frac{\dot{E}x_{ae} + \dot{E}x_p}{\dot{E}x_v + \dot{E}x_{jc}} \quad (17)$$

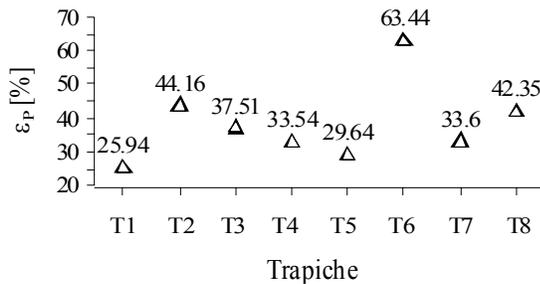


Figura 5. Eficiencia asociada con el proceso.

La figura anterior muestra las eficiencias exergéticas del proceso para los diferentes trapiches. Esta eficiencia depende fundamentalmente de la forma como se realice la transferencia de calor entre el recurso energético y las pailas donde se evapora el jugo. Por lo tanto, su comportamiento depende directamente del área y el coeficiente de transferencia de calor y de la diferencia de temperatura entre gases y pailas. Esto se refleja en los valores presentados por los trapiches con hornilla, de los cuales el tradicional típico (T1) tiene la menor transferencia de calor y el GIPUN (T6) tiene la mayor. Los trapiches T7 y T8 utilizan intercambiadores de calor sumergidos en el jugo para el proceso de evaporación, lo que aumenta el área de transferencia y el coeficiente de convección, pero las pailas

están expuestas al ambiente, por lo que las pérdidas de calor se hacen importantes, limitando la eficiencia exergética del proceso. El trapiche T8 tiene mayor eficiencia del proceso que el T7, dado que en éste se emplea el vapor extraído del jugo para evaporar en una etapa posterior (proceso de evaporación al vacío).

La naturaleza del proceso de evaporación en los trapiches analizados no permite una comparación directa entre los que tienen hornilla y los que emplean vapor.

3.3. Eficiencia total

Esta se define como:

$$\epsilon_T = \frac{\dot{E}x_{ae} + \dot{E}x_p}{\dot{E}x_{bs} + \dot{E}x_{jc}} \quad (18)$$

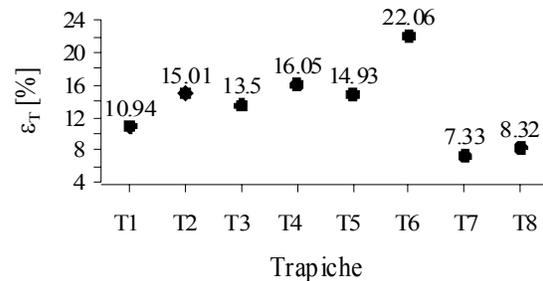


Figura 6. Eficiencia exergética de los trapiches considerando el agua evaporada

La figura 6 muestra un comportamiento similar a la eficiencia del proceso. Se observan diferencias entre trapiches, poniendo de manifiesto cuan bien se usa la energía primaria. El trapiche T6, recién construido y diseñado con el objetivo de mejorar el uso de la energía es el que tiene mejor eficiencia exergética. Los trapiches que usan vapor para el proceso presentan la menor eficiencia exergética debido a dos factores: la energía del combustible sufre un paso adicional de degradación al ser usada en la caldera para producir vapor, y además, las pérdidas por paredes son más significativas.

3.4. Índice de pérdidas por chimenea

Da cuenta de la exergía perdida con los gases de chimenea referida a la suministrada:

$$I_{p, ch} = \frac{\dot{E}x_{gch}}{\dot{E}x_{bs}} \quad (19)$$

Entre mayor sea este índice, mayor exergía se desperdicia con la corriente de gases de chimenea como resultado de altos excesos de aire en la combustión y altas temperaturas de gases de chimenea. Los valores más altos los presentan los trapiches tradicionales típico y de construcción reciente, en los que la temperatura de los gases

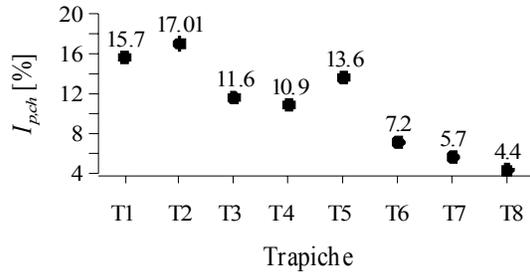


Figura 7. Índice de pérdidas por chimenea.

es bastante alta (813.5 K y 910.3 K) y se tienen grandes excesos de aire (Velásquez et al., 2004). Los mejores resultados son para los trapiches T6, T7 y T8. El trapiche GIPUN tiene una temperatura de gases mucho más baja que los anteriores (686.15 K) y funciona con un exceso de aire más moderado. Los trapiches que emplean vapor tienen una combustión más controlada, ya que el bagazo que se utiliza en las calderas se pulveriza, logrando temperaturas de gases en chimenea relativamente bajas (627 K y 587 K, respectivamente).

Los trapiches se han ordenado de forma aproximada según el grado de evolución tecnológica, lo que se refleja claramente en la tendencia a disminuir de las pérdidas por chimenea.

3.5. Índice exergético de producción

Con el fin de determinar cómo se aprovecha la exergía del combustible, teniendo en cuenta el nivel de producción de los trapiches, se define este índice como el cociente entre el flujo exergético suministrado con el bagazo y el flujo másico de panela producida. Entre más bajo sea el valor de este índice, mejor será la relación aprovechamiento de energía – productividad.

$$I_{ex_{prod}} = \frac{\dot{E}x_{bs}}{m_p} \quad (20)$$

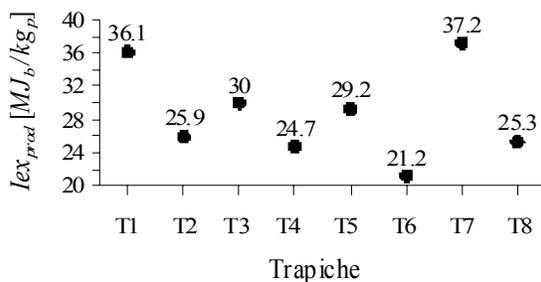


Figura 8. Índice exergético de producción de los trapiches.

El índice exergético de producción del trapiche T1 es muy alto debido que hay muchas pérdidas energéticas y baja productividad. En el trapiche T2 se han reducido

considerablemente las pérdidas por paredes y se ha incrementado la productividad, por lo que se obtiene un índice mejor, compensando en parte las altas pérdidas exergéticas por chimenea. En el trapiche T3 no se seca el bagazo para la combustión, por lo que parte de su energía se emplea en evaporar el contenido agua, elevando su índice. En el trapiche con dos bocas se tiene pérdidas moderadas y el bagazo tiene un proceso de secado muy efectivo, lo que se refleja en su índice menor. Aunque en el trapiche T5 se seca el bagazo, se tienen los mayores excesos de aire y una eficiencia baja en el proceso, lo que se traduce un índice relativamente alto. El trapiche T6 tiene mejoras en el proceso de combustión y en el de transferencia de calor. Adicionalmente, tiene temperatura de gases en chimenea y excesos de aire moderados. Todo esto da como resultado el menor índice exergético de producción. El trapiche T7 se opera con criterios de “producción ecológica”, por lo que

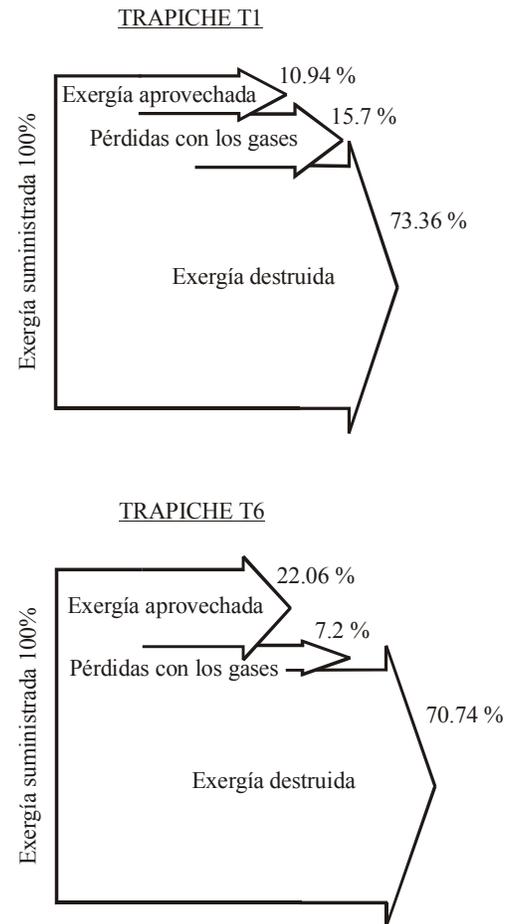


Figura 9. Balance exergético para los trapiches T1 y T6

se sacrifica la productividad en pos de la calidad del producto final. Esto explica que presente el mayor índice. Esto se compensa haciendo el producto más costoso.

Conclusiones

Es conveniente modificar los procesos productivos de la panela dónde la energía del combustible, que es de alta calidad, se utilice para generar potencia y luego emplear energía residual de este proceso (de menor calidad) en la evaporación de los jugos de caña (cogeneración) y así destruir menos exergía en este proceso.

Aunque las mejoras tecnológicas no se traducen en mejoras significativas de la eficiencia exergética, se nota que un diseño de los trapiches usando criterios de uso racional de la energía conduce a mejoras sensibles en la forma como se utilizan los recursos.

En la figura 9 se ha hecho una comparación entre los trapiches T1 y T6 dado que obedecen al mismo principio tecnológico, y uno es una versión mejorada del otro. Se observa que en ambos trapiches es similar la destrucción de exergía, lo que es irremediable, ya que como se dijo, se toma energía de alta calidad para un proceso a baja temperatura. Sin embargo, de la exergía que no se destruye, se logra duplicar la fracción utilizada en el proceso y disminuir el efecto contaminante de las emisiones gaseosas. Debido a que la exergía de los gases de chimenea no se utiliza, este término al final formará parte de la exergía destruida del sistema.

Bibliografía

Chejne Janna, Farid. Termodinámica Básica. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. 2000

CIMPA (1992), Manual para la elaboración de panela y otros derivados de la caña. Barbosa, Colombia.

CORPOICA. Artículos técnicos sobre el cultivo de la caña y la elaboración de panela. Santander: # 17612. 1996.

CORPOICA. Manual de caña de azúcar para la producción de panela. Fedepanela, 2000.

CORPOICA-FEDEPANELA (2000), Manual de caña de azúcar para la producción de panela. Bucaramanga, p. 154.

Dincer, I. and Cengel, Y.A. (2001), Energy, entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. Entropy, Vol. 3, 116-149.

Durán Castro, Néstor. Entrevista. Septiembre 2002.

Gaggioli, R.A. and Petit, P.J. (1977), Use the Second Law, First. Chemtech, August, 496-506.

Guallar J. and Valero, A. (1988), Calculating the Exergy of Industrial Solutions. ASME. Thermodynamic analysis of chemically reactive systems. Eds. W.F. Wepfer, G. Tsatsaronis and R.A. Bajura. ASME Book No. G00449, pp. 45-52. New York.

Henaó R., Carlos, Moreno, Rocío y Olarte, Gilberto. La panela, una agroindustria que se consolida. Fondo Nacional de fomento panelero. 1999.

Hugot, E. Manual para ingenios azucareros. 5ª Ed. Editorial Continental, 1974.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Curso de

caña y elaboración de la panela. Santander: CIMPA, 1986. p. 156.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO-FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Producción de caña y elaboración de la panela. Compendio # 45, 1986.

Jones, J B., Dugan, R E. Ingeniería Termodinámica. Prentice Hall. 1997.

Kotas, T.J. (1995), The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger Publishing Company, Florida.

Lozano, M.A. and Valero, A. (1993), Theory of Exergetic Cost and Thermo-economic Optimization. Proceedings of The International Conference ENSEC'93. Energy Systems and Ecology. Eds. J. Szargut, Z. Kolenda, G. Tsatsaronis and A. Ziebig. Vol 1, 339-350.

Moran, M.J. and Scuibba, E. (1994), Exergy Analysis: Principles and Practice. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 116, 285-290.

Rosen, M.A. (1999), Second Law analysis: Approaches and Implications. International Journal of Energy Research, Vol. 23, 415-429.

Seymour Doolittle, J. El laboratorio del ingeniero mecánico. Editorial HASA, 1971, p.179-181.

Sugar Engineers' Library, www.sugartech.co.za [Consultado en: Octubre de 2004]

Velásquez A., H.I., Chejne J., F. y Agudelo S., A.F. (2004), Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Vol. 57, No. 2. Medellín.

Velásquez, H. I. (2002), Evaluación energética de los procesos productivos de la panela en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Wark, K., Richards, D. Termodinámica. Mc-Graw Hill. 6ª edición. 2001.