

## ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y TERMOECONÓMICO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PANELA EN COLOMBIA

### Hector I. Velásquez A.\*

Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia mecânica. Av. Prof. Mello Moraes Nº 2231- Cidade Universitária. São Paulo. Brasil.  
hivelasq@unal.edu.co

### Juan C. Gutiérrez M.

\*Universidad Nacional De Colombia. Facultad De Minas. Cl 60 Nº 77<sup>A</sup>100. Medellín. Colombia.  
juancarlogutierrez78@yahoo.com

### Silvio de Oliveira Jr.

Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia mecânica. Av. Prof. Mello Moraes Nº 2231- Cidade Universitária. São Paulo. Brasil.  
silvio.oliveira@poli.usp.br

**Resumen.** Este trabajo presenta el análisis de la más importante planta de producción de panela, producto obtenido a partir de la caña de azúcar, en Colombia, que usa evaporación por múltiple efecto para concentrar el jugo de caña, con una producción de 15 t / día. Esta basado en los balances de masa, energía, exergía y termo-económico. Se obtienen diferentes indicadores que permiten analizar el comportamiento energético/exergético de los procesos involucrados en el proceso productivo. Los resultados muestran que aunque esta planta es eficiente, es necesario cambiar algunos equipos e implementar procesos como la generación de potencia, que mejorarían el desempeño energético/exergético de la producción.

*Palabras claves:* Panela 1, exergía 2, termo-economía 3, balances 4.

### Nomenclatura

$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]	$\dot{E}$	Flujo energético [kW]
$\dot{B}$	Flujo exergético [kW]	$B^*$	Costo exergético [kW]
$K^*$	Costo exergético unitario	$C$	Costo exergo-económico unitario [U\$S/kJ]
$P$	Presión [ kPa]	$\dot{Z}$	Costos financieros de equipos [U\$S/s]
$P_Z$	Coefficiente de pureza	$X$	Calidad den vapor y Brix del jugo (%)
$\dot{Q}$	Flujo de calor [kW]	$T$	Temperatura [K]
Letras griegas			
$\eta$	Eficiencia	$\phi$	Humedad relativa (%)
$\pi$	Costo exergo-económico [U\$S/s]	$\gamma$	Costo másico [U\$S/t]
$\pi^*$	Costo exergo-económico bruto [U\$S/s]		
Subscritos			
$L$	Pérdida	$I$	Primera ley de la termodinámica
$II$	Segunda ley de la termodinámica	$R$	Recurso
$d$	Destruída	$i$	Corriente
$max$	Máxima		

## 1. Introducción

La panela, como se llama en Colombia, es un producto alimenticio obtenido al concentrar el jugo de caña de azúcar. Se conoce con los nombres de Rapadura en Brasil y Ecuador, Chancaca en Perú y Chile, Papelón en Centro América y Gur en India y Pakistán.

Colombia es el segundo productor mundial de panela con un volumen de producción del 12.1%. Es el primer consumidor con 34.2 kg por habitante al año, cuando el promedio global oscila en 2 kg lo cual indica, que casi toda la producción se consume internamente (Martínez et al, 2004).

A la producción de panela se vinculan 350.000 colombianos representando el segundo renglón en generación de empleo del país. 70.000 unidades agrícolas cultivan caña destinada para la producción de panela y aproximadamente 15.000 trapiches la elaboran.

A nivel nacional la panela es la cuarta actividad agrícola después del cultivo del café, azúcar y las flores (Corpoica-Fedepanela, 2000).

La panela bien elaborada tiene muy buenas cualidades alimenticias, porque la sacarosa de la caña de azúcar no sufre ninguna transformación, solo la concentración del jugo sin usar ningún tipo de producto químico en su elaboración. Esta característica hacen a la panela un producto natural, con muy buenas posibilidades como producto de exportación.

Desafortunadamente gran parte de producción se realiza en forma artesanal, en pequeñas unidades productivas esparcidas por la geografía colombiana, con muy pocos controles de calidad y volúmenes de producción, convirtiéndose en un producto de subsistencia para los campesinos colombianos.

Cinco diferentes etapas independiente de cual sea el proceso productivo, se pueden encontrar para su elaboración, a saber: 1) *Molienda*: donde el jugo es extraído de la caña de azúcar, resultando un subproducto conocido como bagazo que es usado como combustible. 2) *Clarificación*: donde el jugo es hervido y mezclado con agentes vegetales con el objetivo de retirar los restos de caña, sedimentos del proceso de molienda y demás sólidos en suspensión presentes en el jugo. 3) *Concentración*: donde se extrae el 80% del agua contenida en el jugo y se obtiene un producto conocido como meladura. 4) *Punteo*: en donde se bate la meladura hasta alcanzar el punto de solidificación buscando que permanezca la sacarosa en condiciones óptimas para el consumo. 5) *Moldeo*: donde se da forma a la panela y se dispone para el embalaje y distribución.

Se pueden identificar dos procesos productivos básicos. El primero son Hornillas tradicionales, donde el proceso de clarificación, evaporación y punteo se realiza en intercambiadores de calor (pailas), expuestos a presión atmosférica, usando los gases de combustión directamente como agente energético.

La otra forma son procesos industriales, donde el bagazo alimenta una caldera, produciendo vapor que es usado como el agente energético de intercambio calor con los jugos a través de las etapas de producción.

La planta de producción analizada en este trabajo, es una planta de producción industrial, que tiene como característica principal usar evaporadores de múltiple efecto en la etapa de concentración del jugo de la caña.

## 2. Balance energético y exergético del proceso productivo

Una distribución esquemática de la planta y sus procesos productivos se muestra en la Fig. 1. Las 33 corrientes básicas que intervienen en el proceso son señalizadas con flechas, mientras que los equipos son representados con rectángulos y círculos.

La enumeración utilizada en la Fig. 1, coincide con la utilizada en la Tab. 1, donde se nombra cada corriente y con la enumeración de la Tab. 2, donde se nombran los equipos usados en el proceso.

Es de destacar que el ciclo del vapor de agua es cerrado, el vapor producido en la caldera no es usada para producir trabajo, se utiliza una válvula de expansión, antes de procesar el jugo y el tanque flash donde se recogen los condensados para retornar a la caldera es abierto a la presión atmosférica.

La clarificación y el punteo se realizan en intercambiadores de calor donde el jugo es expuesto a la presión ambiente y la concentración se realiza en evaporadores de triple efecto.

Los balances de masa, energía y exergía se hacen suponiendo un proceso en estado estable, tomando cada equipo como volumen de control.

Los datos termodinámicos de cada corriente para realizar los balances están consignados en la Tab. 1, fueron obtenidos midiendo directamente en los equipos durante una jornada de trabajo.

Las condiciones atmosféricas en promedio, del sitio donde se ubica la planta son de una temperatura ambiente de 300 K, una humedad relativa del 72% y una altitud de 600 msnm.

El poder calorífico del bagazo junto con su composición elemental fue obtenido en el Laboratorio De Carbones de La Universidad Nacional de Colombia y verificado con los valores de Cortez *et al* (1998) y Hugot (1974). Conocida la composición elemental, fue calculada la exergía química del bagazo de acuerdo a las relaciones propuestas en Kotas (1995).

La planta está equipada con medidores de presión y temperatura, la humedad con la cual sale el vapor de la caldera fue suministrada por el fabricante.

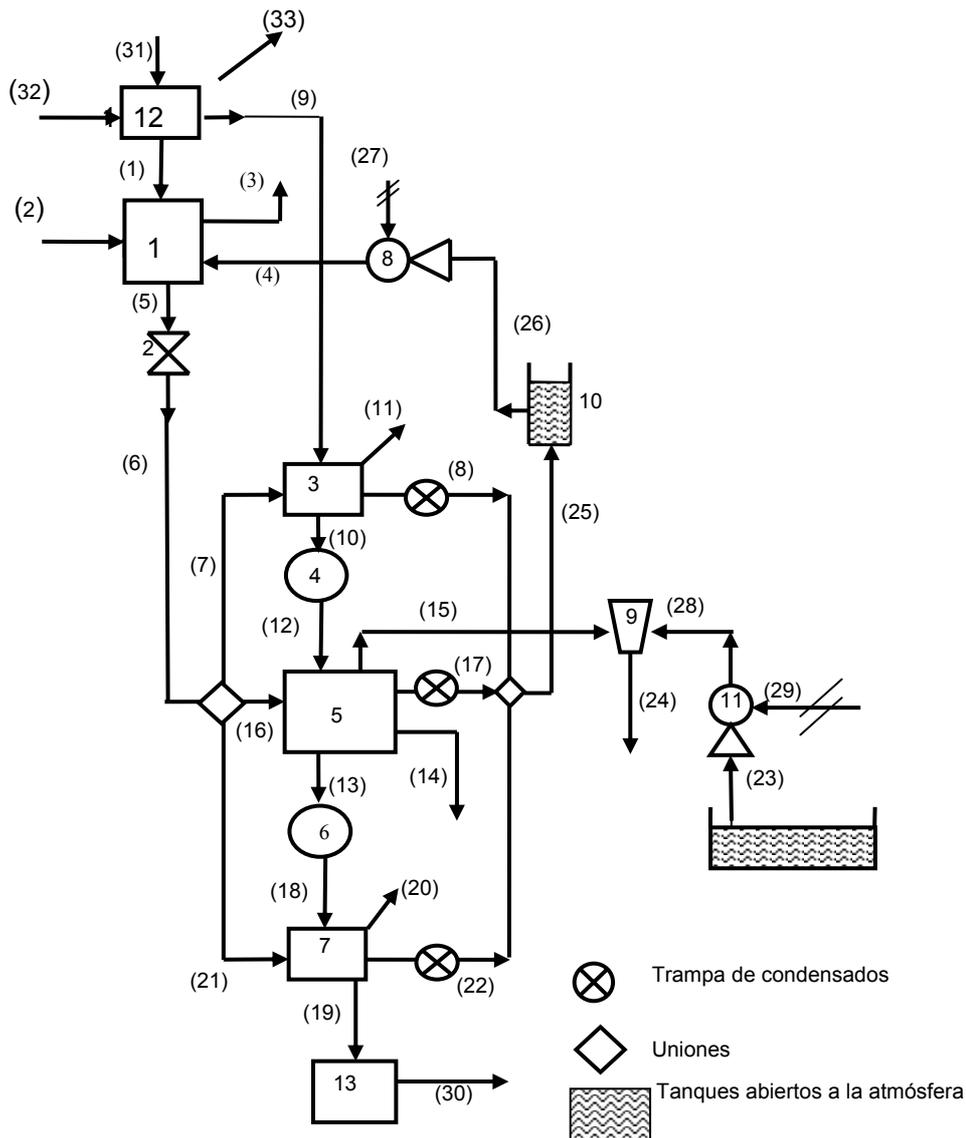


Figura 1. Equipos y Corrientes del proceso productivo.

La pureza, temperatura y concentración de sólidos fueron medidas directamente en el jugo de caña, estos datos permiten determinar la entalpía, entropía, exergía física, exergía química y coeficiente de actividad del jugo, según lo propuesto por Nebra et al. (2005).

Para calcular los balances fue usado el software Engineering Equation Solver (EES), junto con sus librerías de propiedades de vapor de agua y gases ideales.

Algunas corrientes pueden ser recursos o pérdidas en el análisis termo-económico, que se realizará mas adelante, por lo tanto se aprovecha la Tab. 1 para diferenciar estas corrientes, señalándolas entre paréntesis con R y L respectivamente después del nombre. Los resultados obtenidos de los balances de masa, energía y exergía se pueden observar en la Tab. 1.

Tabla 1. Corrientes características del proceso.

i	CORRIENTES	DATOS	$\dot{m}$ [kg/s]	$\dot{E}$ [kW]	$\dot{B}$ [kW]
1	Bagazo	$\Phi = 46,0$ C=44,8% H=6,3 % O=47,6% R=1,3%	0,35	3140,0	3705,0
2	Aire (R)	T=300 P=92 $\varphi = 72,0$	1,50	3,2	4,2
3	Gases de combustión (L)	CO <sub>2</sub> = 12,8% CO=3367ppm O <sub>2</sub> = 7,9% T= 589	1,87	635,5	433,1
4	Líquido saturado	T=330 P=1000	0,82	194,8	6,2
5	Vapor saturado	P=1000 X=92,0	0,82	2134,0	623,4
6	Vapor expandido	P= 300 X=95,0	0,82	2134,0	503,2
7	Vapor para clarificación	P= 300 X=95,0	0,38	959,6	226,3
8	Líquido saturado después de la clarificación	P= 300 X=0,0	0,38	205,9	24,9
9	Jugo verde	T= 298 P <sub>Z</sub> = 0,97 X= 16,0	0,99	103,6	2820,0
10	Jugo clarificado	T= 369 P <sub>Z</sub> = 1 X= 20,0	0,79	318,6	2835,0
11	Agua extraída en la clarificación (L)	P= 92 X=100,0	0,20	529,7	103,9
12	Jugo clarificado frío	T= 298 P <sub>Z</sub> = 1 X= 20,0	0,79	82,7	2810,0
13	Meladura	T= 373 P <sub>Z</sub> = 1 X= 65,0	0,24	102,2	2792,0
14	Condensado de jugo (L)	P= 92 X=0,0	0,37	140,7	28,2
15	Vapor al vacío	P = 54 X= 100,0	0,18	484,7	81,9
16	Vapor para la concentración	P= 300 X=95,0	0,32	832,4	196,3
17	Líquido saturado después de la concentración	P= 300 X=0,0	0,32	178,6	21,6
18	Meladura fría	T= 298 P <sub>Z</sub> = 1 X= 65,0	0,24	25,4	2783,0
19	Panela caliente	T= 393 P <sub>Z</sub> = 1 X=95,0	0,18	84,1	2791,0
20	Agua extraída en el punteo (L)	P= 92 X=100,0	0,08	205,9	40,4
21	Vapor para el punteo	P= 300 X=95,0	0,13	341,9	99,9
22	Líquido saturado después del punteo	P= 300 X=0,0	0,13	73,4	9,0
23	Agua fría (R)	T=300 P=92	22,04	2483,0	0,4
24	Agua mezclada	T=305 P=40	22,22	2968,0	6,1
25	Condensados totales	P= 300 X=0,0	0,82	457,9	55,3
26	Condensados fríos	T = 330 P= 92	0,82	194,1	5,5
27	Energía eléctrica (R)			1,1	1,1
28	Agua caliente	P= 96 T= 305	22,04	2944,0	7,3
29	Energía eléctrica (R)			6,2	6,2
30	Panela fría	T= 298 P <sub>Z</sub> = 1 X= 95,0	0,17	19,5	2781,0
31	Energía eléctrica (R)			19	19,0
32	Caña de azúcar (R)		1,38	3244,0	6936,0
33	Bagazo ahorrado (R)		0,04	320,4	412,0

En la Tabla 2 son identificados los equipos principales de la planta, junto con los resultados obtenidos de pérdidas por transferencia de calor, la eficiencia térmica se calcula según el modelo propuesto por Çengel et al. (2003). La exergía destruida y la eficiencia exergética calculada de acuerdo a Szargut et al. (1985). Además se adicionan los costos financieros de los equipos que serán empleados en el análisis exergo-económico.

Tabla 2. Equipos de la planta de producción.

EQUIPOS		$\dot{Q}_L$ [kW]	$\eta_I$	$\dot{B}_d$ [kW]	$\eta_{II}$	$\dot{Z}$ [U\$/kJ]
1	Caldera	568,9	61,8	2659,0	37,6	16,7
2	Válvula de expansión	0,0	100,0	120,2	0,11	80,7
3	Clarificación	9,0	98,8	82,4	4,08	59,0
4	Almacén de clarificados	235,7	26,0	25,0	0,21	99,0
5	Evaporadores	9,0	98,6	82,5	7,34	52,8
6	Almacén de mieles	76,8	18,0	9,0	0,16	99,6
7	Punteo	4,0	98,5	42,4	3,5	53,4
8	Bomba de condensados	0,5	80,0	0,3	0,2	68,5
9	Tanque de condensados	263,8	42,4	49,8	0,1	9,8
10	Mezclador de vacío	0,0	100,0	76,2	0,8	7,5
11	Bomba para el vacío	5,2	80,0	5,1	0,17	18,1
12	Molienda	19,4	80,0	19,0	12,6	0,0
13	Moldeo	64,6	100,0	10,0	12,6	99,6

### 3. Análisis termo-económico

Para determinar el costo exergético del proceso al producir panela, se realizó un estudio termo-económico basado en los balances anteriormente realizados y el modelo propuesto por Guallar et al. (1994). Para determinar los valores de costo exergético ( $B^*$ ) de las 33 corrientes deben plantearse un sistema de 33 ecuaciones lineales así:

$$\sum_{Entradas} B^* = \sum_{Salidas} B^* \tag{1}$$

Los 13 equipos básicos de la planta originan 13 ecuaciones de balance de costo exergético, las 20 ecuaciones restantes se obtienen de la siguiente forma. El costo exergético unitario se define como:

$$K^* = \frac{B^*}{B} \tag{2}$$

Para los recursos de la planta, que son todos los flujos de exergía que ingresan provenientes del medio, tales como: energía eléctrica, aire, caña de azúcar y agua fría, el costo exergético unitario es la unidad:

$$K_R^* = 1 \tag{3}$$

Existen 6 corrientes de recursos y adicionando el bagazo ahorrado (corriente 33) se obtienen 7 ecuaciones más. En la planta se tienen 4 corrientes de pérdidas que generan 4 ecuaciones:

$$B_L^* = 0 \tag{4}$$

En las uniones el costo exergético unitario es igual, por lo tanto se cumple que:

$$K_{7}^* = K_{16}^* = K_{21}^* = K_{6}^* \tag{5}$$

$$K_{8}^* = K_{17}^* = K_{22}^* = K_{25}^* \tag{6}$$

Originando 6 ecuaciones adicionales. En la evaporación al vacío (equipo 5) se cumple la siguiente equivalencia:

$$K_{13}^* = K_{15}^* \tag{7}$$

Igualmente en el proceso de molienda (equipo 12) se cumple la relación:

$$K^*_1 = K^*_9 \tag{8}$$

La ecuación restante, surge de la proposición para intercambiadores de calor de Chejne et al. (2003), que en este caso se aplica al proceso de clarificación:

$$K^*_8 = K^*_7 \left( \frac{B_d}{B_{max}} \right) \tag{9}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los valores de B\* de cada corriente, junto con el costo exergetico unitario (K\*), los resultados son consignados en la tab. 3.

Tabla 3. Resultados del análisis termo-económico.

i	B* [kW]	K*	$\pi \times 10^{-2}$ [U\$S/s]	$C \times 10^{-5}$ [U\$S/kJ]	$\pi^* \times 10^{-2}$ [U\$S/s]	$\gamma$ [U\$S/t]
1	3949,0	1,1	1,47	0,37	1,26	42,4
2	4,2	1,0	0,00	0,00	0,00	0,0
3	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0
4	187,1	30,2	0,10	0,55	0,06	1,2
5	4141,0	6,6	2,09	0,51	1,32	25,6
6	4141,0	8,2	2,10	0,51	1,32	25,8
7	1862,0	8,2	0,94	0,51	0,59	25,6
8	83,7	3,4	0,04	0,51	0,02	1,1
9	3006,0	1,1	1,12	0,37	0,96	11,3
10	4784,0	1,7	2,13	0,46	1,53	26,9
11	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0
12	4784,0	1,7	2,14	0,46	1,53	27,0
13	6146,0	2,2	3,04	0,49	1,97	124,6
14	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0
15	180,4	2,2	0,90	0,49	0,05	49,2
16	1615,0	8,2	0,82	0,51	0,51	25,8
17	72,6	3,4	0,04	0,51	0,02	1,3
18	6146,0	2,2	3,05	0,50	1,97	125,0
19	6938,0	2,5	3,54	0,51	2,22	212,0
20	0,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
21	821,9	8,2	0,42	0,51	0,26	32,1
22	29,8	3,4	0,02	0,51	0,00	1,5
23	0,4	1	0,00	0,00	0,00	0,0
24	180,8	30,3	0,09	0,51	0,07	0,0
25	186,1	3,4	0,09	0,10	0,05	1,1
26	186,1	34,5	0,10	0,52	0,05	1,2
27	1,7	1,0	0,02	2,70	0,02	N/A
28	187,0	0,7	0,10	0,90	0,07	0,0
29	6,2	1,0	0,01	2,27	0,01	N/A
30	6938,0	2,5	3,80	0,55	2,22	227,5
31	19,0	1,0	0,04	2,27	0,04	N/A
32	6936,0	1,0	2,19	0,32	2,19	16,0
33	412,0	1,0	1,47	0,37	1,26	386,8

Puede apreciarse en la Tab. 3, como el costo exergético de las corrientes del jugo de la caña van aumentando a lo largo del proceso, llegando a tener el valor mas alto en la panela (corriente 30), el costo exergético unitario mas alto está en los condensados (corriente 4), reflejando como esta corriente carga con los costos acumulados del vapor de agua. Las demás variables que aparecen en la Tab. 3, serán definidas en el análisis exergo-económico.

#### 4. Análisis exergo-económico

Paralelo al análisis de costo exergético puede plantearse un análisis en donde se involucren los costos económicos de la planta. Para cada equipo se plantea un balance de la siguiente forma:

$$\sum_{Entradas} \pi - \sum_{salidas} \pi + \dot{Z} = 0 \quad (10)$$

la variable  $\pi$ , costos exergoeconómicos, está determinada por la relación:

$$\pi_i = c_i B^*_i \quad (11)$$

En el valor de  $\dot{Z}$  se tienen en cuenta los costos financieros de adquisición, operación y mantenimiento para cada equipo y se determina con la metodología propuesta por Bejan, (1995). En la Tab. 2, se reportan los valores estimados de  $\dot{Z}$  para cada equipo.

Los costos económicos de los equipos usados en este análisis fueron corroborados con fabricantes de equipos. Otros valores tales como: mantenimiento, mano de obra, financiación, tasas de interés, etc, fueron aproximados a la realidad colombiana. El costo de la energía eléctrica fue consultado de Ministerio de Minas y Energía (2006).

De la misma forma que el costo exergético, el costo exergo-económico se calcula resolviendo un sistema de ecuaciones como se hace para el análisis termo-económico.

En la tabla 3 se encuentran los resultados del costo exergoeconómico ( $\pi$ ) de las corrientes y el costo másico de las mismas ( $\gamma$ ).

El costo exergoeconómico también puede calcularse sin involucrar el costo  $\dot{Z}$  de los equipos, Así:

$$\sum_{Entradas} \pi^* - \sum_{Salidas} \pi^* = 0 \quad (12)$$

E involucrar solo el costo exergo-económico de los recursos:

$$\pi_i^* = c_i B^*_i \quad (13)$$

Esta alternativa de análisis determina el costo exergoeconómico unitario (C), para cada corriente, dada por la expresión:

$$c = \frac{\pi}{B} \quad (14)$$

#### 5. Discusión de resultados y recomendaciones

Como era de esperarse el mayor costo exergético ( $B^*$ ) recae en la panela, ya que ella carga con todas las irreversibilidades ocurridas durante el proceso. Como se puede observa en la Fig. 2, Las corrientes 10, 13, 19, 30 y 32, que están asociadas al jugo de caña, van aumentando su costo exergético, en la medida que pasan por los procesos de clarificación, concentración, punteo y moldeo.

Otro aspecto a resaltar con relación al costo exergético, es como el costo del vapor, (corriente 5), va degradando su valor en la medida que es utilizado en todos los procesos productivos de la planta, llegando a tener el valor más bajo en los condensados recuperados (corriente 4).

En la Figura. 2, puede observarse el comportamiento general del costo exergético de todas las corrientes involucradas en el proceso productivo.

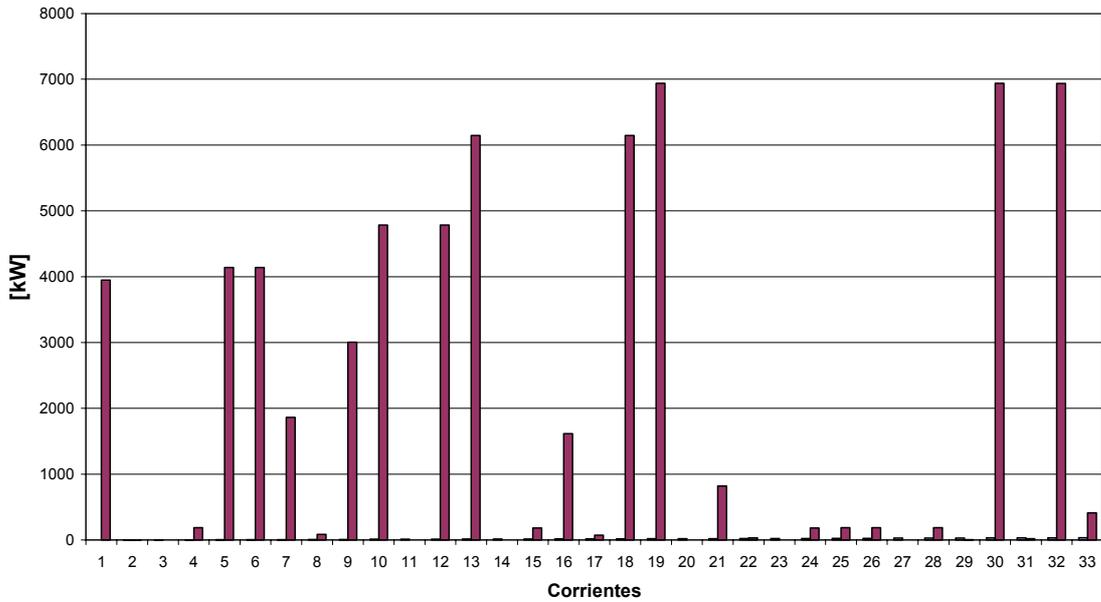


Figura 2. Costo exergetico por corriente (B\*).

Todas las corrientes de condensados del vapor (corrientes 4, 24 y 26), tiene un alto costo exergetico unitario ( $K^*$ ), esto se debe a que al valor de la exergetia de la corriente es muy baja, comparada con la exergetia utilizada para su produccion. No sucede lo mismo con las corrientes del jugo de caña, ya que su exergetia quimica practicamente se conserva a través de todo el proceso.

Los resultados del análisis termo-económico ( $\pi$ ), se visualizan en la Fig. 3. Donde se ha modificado la escala a US\$/h, con el objetivo de visualizar mejor los resultados, Como era de esperarse, los costos van aumentando hasta llegar al valor de 136,7 US\$/h para la panela como producto final.

Otra cosa para resaltar es el valor del costo másico ( $\gamma$ ) de la panela de 227,5 US\$/t. Es de destacar que el precio de mercado en la actualidad es de 318 US\$/t, indicando que es un producto rentable para el productor.

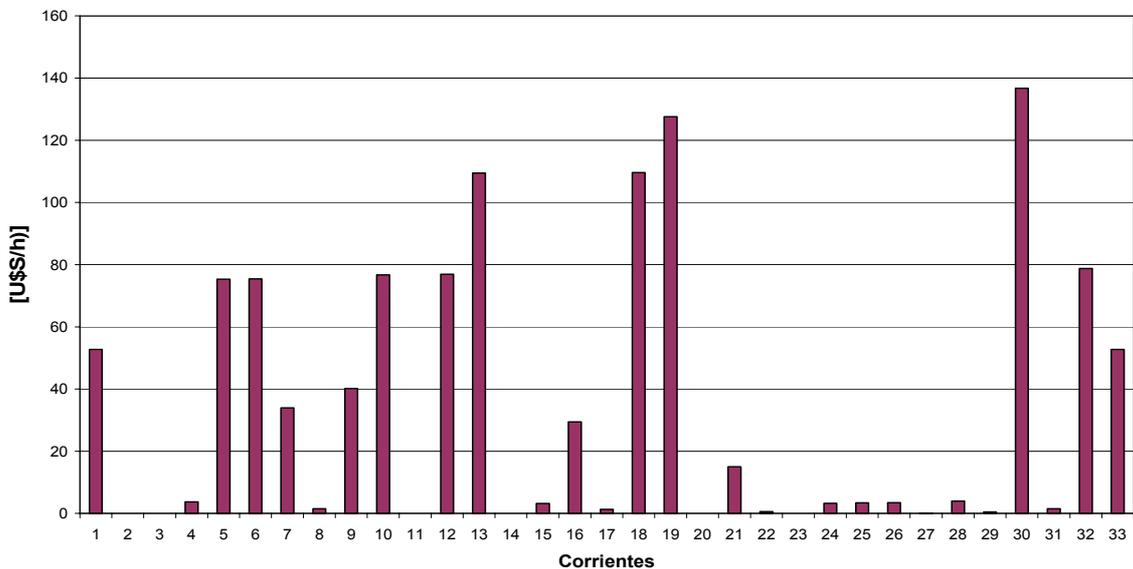


Figura 3. Costos exergo-económico por cada corriente ( $\pi$ ).

Una representación general del comportamiento energético de la planta se puede observar en el diagrama de Sankey de la Fig. 4, donde los flujos de energía de las corrientes usadas en el proceso productivo son señaladas entre paréntesis y su respectivo valor energético dado en kW, es colocado al lado. Se destaca como la energía del bagazo usado como combustible en la caldera se pierde como gases de combustión y perdidas por transferencia de calor, produciendo vapor,



Comparando las magnitudes de cada corriente entre las Fig. 4 y la Fig. 5, puede apreciarse claramente la importancia de realizar el análisis energético y exergético, para tener una mejor visión al momento de realizar modificaciones al proceso.

De todo el análisis surgen algunas recomendaciones, tales como:

- Controlar la combustión y la transferencia de calor en la caldera, disminuyendo la energía en los gases de combustión y las pérdidas de calor .
- Aprovechar la expansión del vapor para producir trabajo mecánico útil dentro de la planta disminuyendo el consumo de energía eléctrica. El costo termoeconómico de la energía eléctrica (corrientes 27 y 31) muestra que estas son las corrientes más costosas comparadas con el vapor que es 6 veces menor.
- Eliminar los almacenamientos de jugo clarificado y concentrado, diseñando un proceso continuo de producción.
- No desperdiciar el vapor extraído al jugo y buscar alternativas de uso en la planta de producción.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se realizó el análisis energético, exergético y termo-económico de un proceso de producción de panela industrial. Estos análisis permitieron conocer el uso de la energía y exergía a lo largo de todos los procesos productivos, permitiendo conocer los puntos susceptibles de mejorar.

Los resultados obtenidos permitieron hacer sugerencias de modificación del proceso, buscando un mejor uso del recurso energético.

El análisis exergo-económico, permitió cuantificar una serie de indicadores de costos de producción y los costos de los distintos flujos que participan en el proceso, dando como resultado que es un producto que permite un margen de utilidad al productor.

## 7. Referencias

- Bejan, A., 1995, "Advanced Engineering Thermodynamics", Ed John Wiley & sons, New York.
- CORPOICA-FEDEPANELA 2000, "Manual de caña de azúcar para la producción de panela". Bucaramanga, Colombia.
- Chejne, F. and Restrepo, J. A., 2003. "New rules for the exergo-economic optimization methodology". Energy. Vol 28, pp 993-1003.
- Çengel, Y.A. and Boles, M.A., 2003. "Thermodynamics", Ed Mc Graw Hill. Fourth edition.
- Cortez, L. A. B. and Gómez, E. O., 1998. "A method for exergy analysis of sugarcane bagasse Boilers", Brazilian Journal Of Chemical Engineering, Vol. 15. São Paulo, Brasil.
- Guallar, J. and Valero, A., 1994 "Estudio termoeconómico de una planta simple de cogeneración", Ingeniería química.
- Gutierrez, J. C. and Camacho, H. A., 2003, "Estudio energético para un proceso no convencional para la producción de panela", Universidad Nacional, Colombia.
- Hugot, E., 1974. "Manual para ingenios azucareros" .5 ta edición, Ed Continental.
- Jones, J. B. and Dugan, R E., 1997. "Ingeniería Termodinámica" .Prentice hall.
- Kotas, T.J., 1985 "The exergy method of thermal plant analysis", Butterworths.
- Martínez, H. and X. Acevedo, 2004, "Características y estructura de la cadena agroindustrial de la panela en Colombia", Documento de trabajo No 12. Ministerio de agricultura, Bogotá, Colombia.
- Nebra, S.A., and Fernandez-Parra, M.I, 2005 "The exergy of sucrose-water solutions: proposal of a calculation method", Ecos 2005, Trondheim, Norway, June 20-22, Vol1, pp 385-392.
- Ministerio de minas y energía, www.mem.com.co. 2006 "Bolsa de energía eléctrica nacional", Colombia.
- Pellegrini, L.F., Oliveira. Jr, S, 2006. "Exergetic evaluation of multiple effect evaporators in sugarcane mills". Ecos 2006, Aghia, Crete, Grece, July 12-14, Vol 1, pp 207-214.
- Szargut, J Morris DR, Steward FR, 1985, "Exergy method of thermal Plant Analysis". Butterworths.
- Velásquez, H. I. 2002 "Evaluación energética de los procesos de la panela en Colombia" Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.
- Wark, K. and Richards D., 2001. "Termodinámica". Editorial Mc-Graw Hill. Sexta edición.

## **THERMODYNAMIC AND THERMOECONOMIC ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF UNREFINED SUGAR IN COLOMBIA**

**Hector I. Velásquez A.\***

Polytechnic School-University of Sao Paulo, Department of Mechanical Engineering. Av. Prof. Mello Moraes Nº 2231- Cidade Universitária. São Paulo. Brasil  
hivelasq@unal.edu.co

**Juan C. Gutiérrez M.**

\*National University Of Colombia, Facultad De Minas. Cl 60 Nº 77 a 100. Medellín- Colombia  
juancarlosgutierrez78@yahoo.com

**Silvio de Oliveira Jr.**

Polytechnic School-University of Sao Paulo, Department of Mechanical Engineering. Av. Prof. Mello Moraes Nº 2231- Cidade Universitária. São Paulo. Brasil.  
silvio.oliveira@poli.usp.br

*This work presents an analysis of the most important unrefined sugar industrial plant in Colombia, that is obtained from sugarcane, that uses multiple-effect evaporators to concentrate the juice, with a production of 15 t per day. This analysis is based on mass, energy, exergy and thermoeconomic balances, in order to provide a thoroughly understanding of the production process. Different indicators are obtained that allow an analysis of the energetic/exergetic behavior of processes involved in the production of unrefined sugar.*

*The results show that, although, this plant presents the most efficient production process in Colombia, it is necessary to change some equipment and implementing other processes, like power generation, to improve the energetic/exergetic behavior of the plant.*

*Keywords: Unrefined sugar, Exergy analysis , Thermoeconomic analysis.*