

Valoración económica de las pérdidas de exergía de las operaciones térmicas en la industria azucarera de caña*

Dora Paz** y Gerónimo J. Cárdenas**

RESUMEN

Tomando como base los resultados del análisis exergético de las operaciones térmicas: Calentamiento-Evaporación-Cristalización (CEC) de un ingenio de Tucumán, realizado por Paz y Cárdenas en 2005, se procedió a determinar el valor económico de las pérdidas de exergía. Dichas pérdidas de exergía representan potencias eléctricas equivalentes que dejaron de producirse, por lo que el daño causado por las mismas puede ser calculado directamente a partir del precio de la energía eléctrica. Esta original metodología propuesta para determinar ahorros monetarios, basada en la reducción de exergía perdida, se comparó con los resultados obtenidos con la metodología tradicional (basada en el ahorro de vapor vivo). Los ahorros monetarios logrados con las propuestas A y B fueron de $\$1,05 \times 10^6$ ($0,35 \times 10^6$ USD) y $\$1,92 \times 10^6$ ($0,64 \times 10^6$ USD) por zafra, determinándose Tasas Internas de Retorno (TIR) de 191% y 20,8%, respectivamente.

Palabras clave: energía, exergía, motores hidráulicos, TIR.

ABSTRACT

Economic value of exergy losses in heating operations in cane sugar mills

This paper is based on the results of previous work done by Paz and Cárdenas in 2005, in which exergy losses in thermal operations: Heating-Evaporation-Crystallization (H-E-C) of a cane sugar mill located in Tucumán, were evaluated. Exergy losses represent equivalent non-produced electric power; therefore, the resulting damage can be calculated directly from the price of the electric energy. Results obtained with this novel methodology (exergy loss reduction) were compared with those obtained with the traditional method (live steam saving) when evaluating monetary savings. In fact, monetary savings in A and B proposals were $\$1,05 \times 10^6$ ($0,35 \times 10^6$ USD) and $\$1,92 \times 10^6$ ($0,64 \times 10^6$ USD) per season, respectively. Internal Rates of Return (IRR) were 191% and 20,8%, respectively.

Key words: energy, exergy, hydraulic motors, IRR.

* Parte del trabajo de tesis doctoral de Paz, D. : "Modelado exergoeconómico de fábricas de azúcar de caña" (28/09/05).

** Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. ingenieria@eeaoc.org.ar.

INTRODUCCIÓN

La calidad (capacidad para producir cambios) de formas desordenadas de energía, caracterizadas por la entropía, se conoce como exergía y depende tanto de la forma de la energía (química, térmica, etc.) como de los parámetros del que transporta la energía y del ambiente (Baloh y Wittwer, 1995). Por otro lado, las formas ordenadas de energía que no están caracterizadas por la entropía, como la energía eléctrica, presentan calidad invariable y pueden convertirse totalmente, a través de la interacción del trabajo, en otras formas de energía.

La exergía indica el trabajo aprovechable que un sistema puede entregar: es la parte de la energía que es posible transformar en trabajo útil y que tiene un valor económico. El resto de la energía del sistema, a la que se denomina anergía, no es recuperable. El balance de exergía como un postulado de la 2ª ley de la Termodinámica, permite determinar las pérdidas de exergía debido a la irreversibilidad de todos los procesos reales.

Baloh y Wittwer (1995) postulan que "los flujos de exergía representan potencias eléctricas equivalentes, de modo que el daño causado por las pérdidas de exergía puede ser calculado directamente a partir del precio de la energía eléctrica". Esto equivaldría a decir que la exergía perdida es energía eléctrica que dejó de producirse (Christodoulo, 1996), teniendo en cuenta que la energía eléctrica es 100% exergía. Si bien esta idea como concepto teórico ha sido introducida en la bibliografía consultada, no se han reportado ejemplos de aplicación concretos.

El objetivo de este trabajo es determinar el valor económico de las pérdidas de exergía (energía eléctrica que dejó de producirse) en las operaciones de Calentamiento-Evaporación-Cristalización (CEC) de una fábrica azucarera en Tucumán, tomando como punto de partida los resultados de un trabajo previo (Paz y Cárdenas, 2005). Se analizarán dos alternativas mejora-

doras de un sistema CEC, tomado como caso base, se determinará la reducción de exergía perdida, y finalmente se evaluará la rentabilidad de las propuestas de mejora.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se partió de los resultados de la evaluación de las pérdidas de exergía en las operaciones térmicas de Calentamiento-Evaporación-Cristalización (CEC) en un ingenio de Tucumán, de 6800 toneladas de caña por día de capacidad, realizado por Paz y Cárdenas (2005). Este ingenio cuenta para la molienda de caña con dos trapiches: uno con capacidad para procesar el 78% de la caña, accionado con turbinas de vapor de bajo consumo específico (trapiche 1) y otro que procesa el 22% de la caña, accionado con turbinas de alto consumo específico de vapor (trapiche 2).

En el mencionado trabajo se determinaron los balances de masa y energía, los balances de exergía, las pérdidas de exergía y la eficiencia exergética en el sistema CEC del caso base y en dos nuevas propuestas. El sistema de evaporación del caso base, calentado con vapor escape (VE, de 2,18 bar de presión y 122°C), operaba en cuádruple efecto en paralelo, con extracciones de vapor vegetal para calentamiento de jugo encalado (JE) del 1º, 2º y 3º efecto de evaporación (VG1, VG2 y VG3), empleándose vapor de escape para calentar los tachos de cocción (ver Fig.1). El consumo total de vapor escape en CEC asciende a 56,9% Caña; es decir 56,9 kg de vapor por cada 100 kg de caña procesada.

Este sistema se tomará como referencia al analizar las nuevas propuestas.

Paz y Cárdenas (2005) analizaron dos propuestas mejoradoras del sistema CEC, que contemplan: incrementos en el área de intercambiadores de calor, aumento del número de efectos de evaporación, reemplazo o eliminación de un equipo ineficiente o anticuado, etc.

Propuesta A: operar el sistema en quintuple efecto, con extracciones de vapor vegetal de todos los efectos para

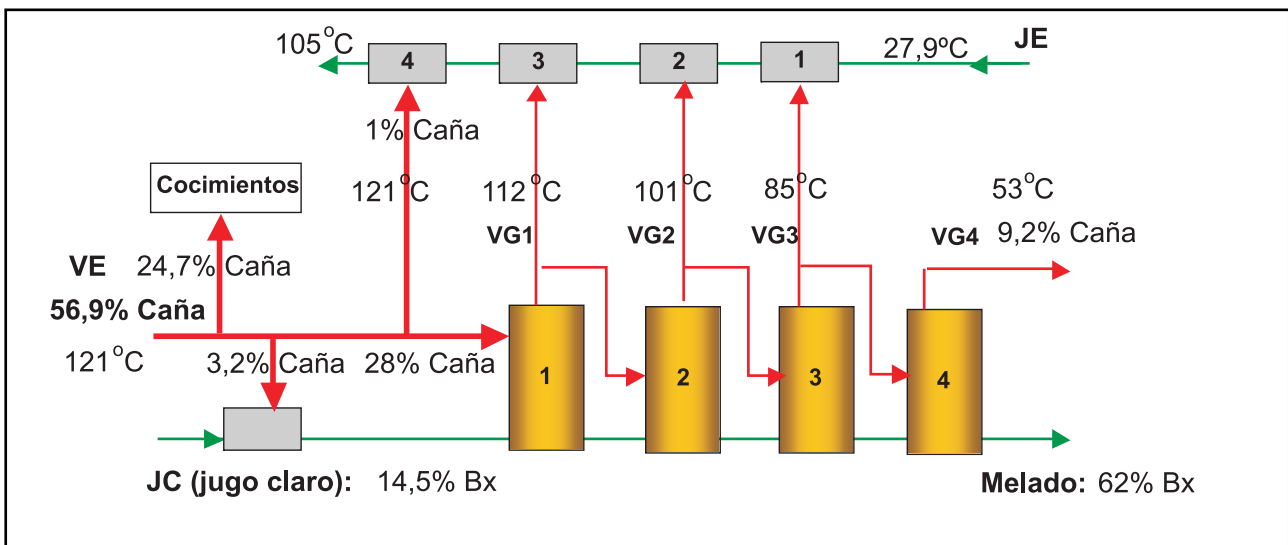


Figura 1. Esquema del sistema CEC del caso base.

calentamiento de jugo encalado. Las demás condiciones del sistema CEC se mantienen sin variantes. En la Figura 2 se muestra un esquema del sistema CEC de la propuesta A, donde se indican los nuevos equipos a adquirir en calentamiento y evaporación. El consumo de vapor en CEC asciende a 48,4% Caña.

Propuesta B: redimensionar el esquema de evaporación para alimentar con vapor vegetal (VG1) al sector de cristalización, concentrando el melado hasta 70°Bx, lo que implica además un menor consumo de vapor en esa operación. Las demás condiciones serían idénticas a la propuesta A. Para evitar el venteo de vapor al ambiente, se proponen dos modificaciones en el sistema:

1) Eliminar las turbinas de vapor de accionamiento del trapiche 2, y sustituirlas por **motores oleohidráulicos**.

2) Reemplazar los accionamientos con turbinas de vapor de los ventiladores de tiro inducido (VTI) y turbobombas de calderas por **motores eléctricos**.

El motor hidráulico es un equipo que forma parte de un sistema oleohidráulico, encargado de convertir energía hidráulica en energía mecánica. Comprende dos circuitos independientes:

A) El circuito de presión, accionado por la bomba eléctrica de aceite;

B) Un circuito de regulación por variación de la cilindrada, accionado por la bomba (eléctrica), que constituye el motor hidráulico.

Desde el punto de vista energético, sustituir turbinas de vapor de alto consumo específico por motores oleohidráulicos y/o eléctricos alimentados por el turbo generador de la fábrica (usina), de menor consumo específico, trae como consecuencia una reducción en el requerimiento de vapor vivo de las calderas y, por ende, beneficios económicos (Golato y Paz, 2004).

Cabe aclarar que la planta de generación de energía eléctrica de la fábrica estudiada tiene capacidad insta-

lada suficiente para abastecer la demanda extra de los nuevos motores a instalar en la propuesta B, por lo que no será necesario comprar energía eléctrica para atender a los nuevos consumidores.

En la Figura 3 se muestra un esquema del sistema CEC de la propuesta B, con los nuevos equipos a adquirir, siendo el consumo de vapor en CEC de 40,1% Caña.

El balance de exergía para un proceso en estado estacionario se determinó de la siguiente forma:

$$\dot{E} = \dot{E}_k + \dot{E}_p + \dot{E}_f + \dot{E}_o$$

Donde:

$\dot{E}_e$ = exergía que ingresa con los flujos de entrada al sistema.

$\dot{E}^o$ = exergía que sale con los flujos de salida del sistema.

$\dot{E}_s$ = exergía del calor transferido al sistema.

$\dot{W}_x$ = trabajo de eje.

$\dot{E}_{perd}$ = pérdida de exergía por irreversibilidad.

En la Tabla 1 se muestra la exergía perdida en el caso base y en las propuestas A y B; las disminuciones de exergía perdida en el sistema CEC se tradujeron en un menor requerimiento de vapor de calefacción (vapor de escape) para esas operaciones y del vapor vivo necesario a generar en calderas (Paz y Cárdenas, 2005).

La reducción porcentual de irreversibilidades (exergía perdida) en el sistema CEC de la propuesta A, 17,4% respecto al caso base, produce una disminución en el consumo de vapor de 15,4%; mientras que en la propuesta B, la reducción de pérdidas exergéticas alcanza al 31,9% respecto al caso base, y el vapor consumido disminuye en un 29,6%. La leve discrepancia entre estos porcentajes se debe a no haber considerado la pérdida de exergía por radiación al aumentar las superficies de intercambio de

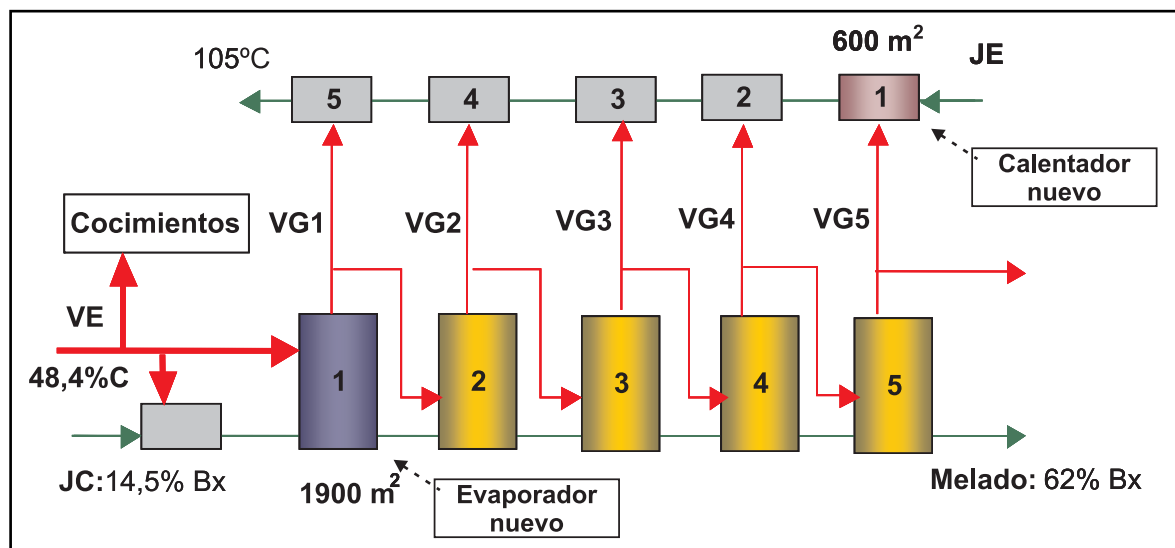


Figura 2. Esquema del sistema CEC de la propuesta A.

14 - EEAOC - RIAT 2005 - N° 82 TOMO 1 - 2

Tabla 1. Pérdidas de exergía, consumo de vapor de escape en los sistemas CEC y consumo de vapor vivo del caso base y las propuestas A y B.

	Caso base	Prop. A	Prop. B
Pérdidas de exergía en CEC (kW)	24.569	20.292	16.742
<i>Disminución de pérdidas (%)</i>		17,40	31,90
Consumo vapor de escape en CEC (% Caña)	56,90	48,20	40,10
<i>Disminución del consumo de vapor (%)</i>		15,40	29,60
Consumo vapor vivo (% Caña)	61,30	52,00	43,40
<i>Disminución del consumo de vapor (%)</i>		15,20	29,20

Donde:

PCI_B = poder calorífico inferior del bagazo, 7113 (kJ/kg) (Hugot, 1986).

PCI_{GN} = poder calorífico inferior del gas natural, 35.146 (kJ/Nm³) (Hugot, 1986).

η_B = rendimiento energético de la planta de calderas del ingenio analizado, que quema bagazo con un 50% de humedad, cuyo valor es 68,8%.

η_{GN} = rendimiento energético de calderas que queman gas natural, 80%.

ΔH_v = diferencia de entalpía entre el vapor producido y el agua de ingreso, 2720 kJ/kg.

El gas natural (GN) total ahorrado respecto al caso base sería:

GN total ahorrado = GN gastado en el caso base - GN gastado en propuesta A.

El GN gastado en el caso base asciende a 2323 Nm³/h (Paz y Cárdenas, 2005).

En este caso, en la propuesta A no se emplea combustible adicional, sino que se ahorra bagazo, y por lo tanto, GN equivalente.

GN total ahorrado = GN gastado en el caso base + GN ahorrado en propuesta A.

GN total ahorrado = 2323 Nm³/h + 549 Nm³/h = 2872 Nm³/h.

Considerando, en noviembre del 2003, el costo del GN en 0,11 \$/Nm³ (0,037 USD/Nm³), el ahorro monetario para la propuesta A asciende a \$1.137.401, es decir, aproximadamente $1,14 \times 10^6$ ($0,38 \times 10^6$ USD) para una zafra de 150 días.

Siguiendo igual metodología se realizaron los cálculos para la propuesta B, obteniéndose un ahorro monetario

Tabla 2. Ahorro monetario para las propuestas A y B.

	Prop. A	Prop. B
Metodología 1		
Ahorro de exergía perdida (kW)	4.277,00	7.827,00
Ahorro 1 (10^6 \$/zafra)	1,05	1,92
Metodología 2		
Vapor vivo ahorrado (t/h)	26,30	50,70
Gas natural ahorrado (Nm ³ /h)	2.872,20	5.205,70
Ahorro 2 (10^6 \$/zafra)	1,14	2,06
Diferencia entre ambas (%)	8,50	6,90

de $2,06 \times 10^6$ ($0,69 \times 10^6$ USD) para una zafra de 150 días.

A modo de comparación, en la Tabla 2 se presentan los resultados de ahorro monetario para las propuestas A y B, evaluados empleando las metodologías 1 y 2.

Se observa que ambas metodologías arrojan resultados de orden semejante en la estimación del ahorro monetario para las propuestas A y B, siendo la diferencia entre ambas del 8,5% y 6,9% respectivamente.

Un aspecto importante de aclarar es que los análisis 1 y 2 son completamente diferentes. Uno de ellos evalúa en base al costo de generación de la energía eléctrica, el otro en base al costo de generación de vapor con gas natural. De hecho, no hay motivo para que los resultados sean próximos. Si lo son en este caso es porque probablemente el costo de la energía eléctrica está basado en una generación con gas natural y en sistemas con eficiencia similar. Pero si el costo de la energía eléctrica proviniese de otras fuentes, de costos distintos, el resultado podría ser muy diferente.

Inversiones requeridas

En las Tablas 3 y 4 se muestran las inversiones requeridas para las propuestas A y B, respectivamente. Estos valores están tomados a noviembre del 2003, siendo la cotización del dólar de: 1 USD = 3 \$ argentinos.

Determinación de la rentabilidad

Para el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) se ha empleado el ahorro monetario calculado con la metodología propuesta en este trabajo (Ahorro 1).

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis de rentabilidad efectuado para las propuestas A y B.

Las inversiones de capital en la propuesta A ascienden a \$520.000 (173.333 USD). Considerando un

Tabla 3. Inversiones a realizar en la propuesta A.

Ítem	Inversión en \$
Caja de evaporación Robert de 1900 m ²	400.000
Calentador de tubos-carcaza de 600 m ²	90.000
Conexiones y cañerías	30.000
Total	520.000

Tabla 4. Inversiones a realizar en la propuesta B.

Ítem	Inversión en \$
Motores oleohidráulicos y gastos de montaje e infraestructura para el trapiche 2	4.524.986
Motores eléctricos para VTI de calderas y bombas de agua de alimentación	110.403
Caja de evaporación Robert de 3600 m ²	800.000
Calentador de tubos-carcaza de 600 m ²	90.000
Conexiones y cañerías	30.000
Total	5.555.389

Tabla 5. Resultados del análisis de rentabilidad.

	Prop. A	Prop. B
Ahorro 1 (10 ⁶ \$/zafra)	1,05	1,92
Inversión (10 ⁶ \$)	0,52	5,56
TIR (%)	191,00	21,00
Período de repago (días de zafra)	74	434

período de amortización de 10 años, se han obtenido una TIR del 191% y un período de repago de 74 días de zafra.

Las inversiones de capital en la propuesta B ascienden a \$5.555.389 (1.851.796 USD), obteniéndose una TIR del 20,8% y un período de repago de 434 días de zafra. Como puede observarse, ambas propuestas presentan TIR y períodos de repago convenientes.

CONCLUSIONES

- El balance exergético demuestra que, también en la consideración de sistemas CEC, es una herramienta apropiada para evaluar las **pérdidas de capacidad de producción de trabajo útil** (exergía perdida) en estos sistemas, complementando adecuadamente a los balances de energía que no cuantifican esta variable.
- Se propone una **nueva metodología de estimación de los ahorros monetarios** al comparar diferentes esquemas CEC, basada en la disminución de exergía perdida

y la asignación de su valor económico. Se trata de una metodología novedosa, enunciada en la bibliografía consultada, pero sin ejemplos de aplicación concretos en la industria azucarera.

- Se comparan los ahorros monetarios obtenidos en base al costo de generación de la energía eléctrica, con los resultantes de la evaluación tradicional basada en el costo de generación de vapor con gas natural. Aunque no hay motivo para que estos resultados sean próximos, en este caso lo son porque probablemente el costo de la energía eléctrica está basado en una generación con gas natural, en sistemas con eficiencia similar.
- **El análisis exergoeconómico ha permitido cuantificar las pérdidas de exergía en sistemas CEC y evaluar económicamente el daño causado** por las mismas. Con los esquemas CEC de las propuestas A y B, se logran ahorros monetarios por disminución de pérdidas de exergía respecto al caso base de un valor económico de \$1,05 x 10⁶ (0,35 x 10⁶ USD) y \$1,92 x 10⁶ (0,64 x 10⁶ USD) por zafra, respectivamente. Las Tasas Internas de Retorno (TIR) determinadas resultaron de 191% para la propuesta A y 20,8% para la B, siendo los períodos de repago para la inversión de 74 y 434 días de zafra, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Baloh, T. and E. Wittwer. 1995.** Energy manual for sugar factories. 2. ed. Bartens, Berlin.
- Christodoulo, P. A. 1996.** Energy economy optimization in separation processes. Optimizing the separation of sucrose/water and non sugars. International Sugar Journal 98 (1172): 56-61.
- Golato, M. A. y D. Paz. 2004.** Posibilidad de utilización de motores oleohidráulicos en fábricas de azúcar de caña. Avance Agroind. 25 (3): 41-44.
- Hugot, E. 1986.** Manual para ingenieros azucareros. 1. ed. en español. CECSA, México.
- Paz, D. y G. J. Cárdenas. 2005.** Evaluación exergética de propuestas de disminución de consumo de vapor en usinas azucareras. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 82 (1-2): 1-10.