

## Evaluación exergetica de propuestas de disminución de consumo de vapor en usinas azucareras

Dora Paz\* y Gerónimo J. Cárdenas\*

### RESUMEN

Se realizó un modelado exergetico, basado en la 2ª ley de la Termodinámica, para la evaluación de las operaciones térmicas de Calentamiento-Evaporación-Cristalización (CEC) en un ingenio de Tucumán. Una vez resueltos los balances de masa y energía de sistemas CEC, se determinaron los balances de exergía, evaluando las pérdidas de exergía y la eficiencia exergetica. Se emplearon ecuaciones y gráficos existentes en la bibliografía para evaluar las propiedades termodinámicas de los flujos intervinientes. Se simuló y comparó con el caso base (zafra 2000), dos propuestas tendientes a disminuir las pérdidas de exergía, considerando: aumento de efectos de evaporación, mayor aprovechamiento de vapores vegetales, aumento en la concentración de melado, empleo de vapor vegetal para la cristalización y reemplazo de turbinas de vapor ineficientes por motores oleohidráulicos y eléctricos. Los resultados mostraron que las menores eficiencias exergeticas se producen en condensadores barométricos de cristalización y evaporación, y en cristalización. La reducción de irreversibilidades en las propuestas analizadas permitiría eliminar el combustible adicional necesario para operar calderas bagaceras antiguas.

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

### ABSTRACT

#### Exergetic evaluation of proposals for steam consumption reduction in sugar factories

Exergetic modelling, based on exergetic analysis (2<sup>nd</sup> law of Thermodynamics), was applied in assessing Heating-Evaporation-Crystallization (H-E-C) thermal operations in a cane sugar mill in Tucumán (Argentina). After solving mass and energy balances in H-E-C systems, exergy balance was determined. Exergy losses and exergetic efficiency were calculated. Equations and graphics found in bibliographic sources were used to calculate thermodynamic properties of intervening flows. Two alternatives for reducing exergy losses were simulated and compared with base case (2000 season). These alternatives aimed at the following goals: more evaporation effects, better use of juice vapours, increase in syrup concentration, and replacement of inefficient steam turbines with hydraulic and electric motors. Results showed that the lowest exergy efficiency levels are obtained in barometric condensers and in the crystallization process. The reduction of irreversibilities in the analyzed proposals would allow eliminating the extra fuel normally used to operate old local bagasse boilers.

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

---

\* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. [ingenieria@eeaoc.org.ar](mailto:ingenieria@eeaoc.org.ar).

## INTRODUCCIÓN

Diversos autores han abordado el concepto de exergía y su aplicación al análisis de procesos (Rant, 1956; Brodyanskii, 1973; Vallejo, 1982; Valero *et al.*, 1986; Tsatsaronis, 1984; Kotas, 1985; Guallar, 1987; Anaya y Rivero, 1988; Rivero, 1994; Baloh y Wittwer, 1995; Paz y Cárdenas, 1997; Fernández y Nebra, 2001).

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, como la energía eléctrica o mecánica, presentan calidad invariable y pueden, a través de la interacción del trabajo, convertirse totalmente en otras formas de energía.

La exergía indica el trabajo aprovechable que un sistema puede entregar: es aquella 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. Cada proceso técnico que ocurre a una cierta velocidad tiene pérdidas de exergía, mientras que en los procesos ideales o reversibles, la velocidad es igual a cero y las pérdidas son nulas. Se puede interpretar la pérdida de exergía como la energía que es necesario consumir para obtener la velocidad correspondiente del proceso (Baloh y Wittwer, 1995). El balance de exergía considera tanto los cambios de entalpía como los de entropía, y es este balance el que descubre las pérdidas que ocurren en los procesos o equipos debido a irreversibilidades (estrangulamiento, intercambio de calor, mezcla de fluidos, reacciones químicas, etc.).

El balance de exergía es un postulado de la ley de degradación de la energía (2º ley de la Termodinámica), y es equivalente a la pérdida irrecuperable de exergía debido a la irreversibilidad de todos los procesos reales.

En un ingenio azucarero de caña, las operaciones de mayor consumo de energía térmica son los Calentamientos de jugo, la Evaporación y el sector de Cristalización, los que constituyen el sistema conocido como CEC. Para la mayoría de estos procesos u operaciones disipativas, aún un incremento muy pequeño en la eficiencia exergética producirá un impacto importante en la cantidad de energía ahorrada.

El objetivo de este trabajo es evaluar propuestas tendientes a disminuir las pérdidas de exergía en un ingenio azucarero de caña en Tucumán, considerando: aumento de efectos de evaporación, mayor aprovechamiento de vapores vegetales, aumento en la concentración de melado, empleo de vapor vegetal para la cristalización y reemplazo de turbinas de vapor ineficientes por motores oleohidráulicos y eléctricos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La fábrica, tomada como caso de estudio, es un ingenio situado en Tucumán, cuya capacidad de procesamiento es de 6800 toneladas de caña por día. Este ingenio cuenta para la molienda de caña con dos trapiches: 1) Dedini, con capacidad para moler 5300 t de caña/día, con turbinas de vapor de accionamiento de alta eficiencia y

bajo consumo específico de vapor y 2) Krupp con capacidad para moler 1500 t de caña/día, con turbinas de accionamiento de baja eficiencia y alto consumo específico de vapor.

La planta dispone de un sistema de evaporación, calentado con vapor escape (de 2,18 bar de presión y 122°C), con dos tandems que operan en cuádruple efecto en paralelo. Las extracciones de vapor vegetal para calentamiento de jugo encalado se efectúan del 1º, 2º y 3º efecto de evaporación. Se emplea vapor escape para la calefacción de los tachos de cocción (Cristalización). Este sistema se tomará como caso base o de referencia al analizar las propuestas mejoradoras.

La metodología empleada consta de los siguientes pasos:

### 1) Elaboración del diagrama de bloques del proceso.

Se procedió a la traducción del diagrama de flujos del proceso en un diagrama de bloques, incluyendo no sólo las corrientes de energía y de materia que se muestran en un diagrama de flujo, sino también todas las entradas y salidas que representen un flujo de exergía en cada bloque (servicios auxiliares, motores eléctricos, pérdidas de calor a través de aislamientos térmicos, etc.).

### 2) Resolución de los balances de masa y energía en cada bloque del proceso.

Se empleó el software de simulación de sistemas CEC: SIMCE 2.0, que emplea modelos matemáticos determinísticos para simular el funcionamiento de cada equipo involucrado en el sistema (López *et al.*, 2000).

### 3) Resolución del balance de exergía en cada bloque del proceso.

La exergía de una corriente  $\dot{E}$  puede ser dividida en diferentes componentes. En ausencia de efectos nucleares, magnetismo, electricidad y tensión superficial,  $\dot{E}$  es:

$$\dot{E} = \dot{E}_k + \dot{E}_p + \dot{E}_f + \dot{E}_o \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$\dot{E}_k$  = exergía cinética.

$\dot{E}_p$  = exergía potencial.

$\dot{E}_f$  = exergía física.

$\dot{E}_o$  = exergía química.

La ecuación 1 (Ec.1) también puede escribirse en su forma específica, introduciendo la exergía específica,  $\varepsilon = \dot{E} / \dot{m}$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_p + \varepsilon_f + \varepsilon_o \quad (\text{Ec. 2})$$

En el caso de procesos CEC estudiados, no se consideran los términos de: exergía química específica, exergía potencial específica y exergía cinética específica, por lo que la exergía específica se reduce a la componente física.

$$\varepsilon = (h - h_o) - T_o.(s - s_o) \quad (\text{Ec. 3})$$

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

$$\dot{E}_e + \dot{E}^Q = \dot{E}_s + \dot{W}_x + \dot{E}_{\text{perd}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$\dot{E}_e = \sum_{ENTRA} m \cdot \varepsilon$  = exergía que ingresa con los flujos de entrada al sistema.

$\dot{E}_s = \sum_{SALE} m \cdot \varepsilon$  = exergía que sale con los flujos de salida del sistema.

$\dot{E}^Q = \sum_{\tau} \left[ Q_{\tau} \frac{T_{\tau} - T_o}{T_{\tau}} \right]$  = exergía del calor transferido al sistema.

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

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

Para los cálculos exergéticos se han empleado dos opciones:

- La planilla de cálculo Excel y su utilitario Solver.
- El módulo exergía del software SIMCE 2.0

#### 4) Determinación, en cada bloque y en todo el proceso, de las pérdidas de exergía y la eficiencia exergética simple.

Del balance de exergía, tenemos:

$$\begin{aligned} \dot{E}_e + \dot{E}^Q &= \dot{E}_s + \dot{W}_x + \dot{E}_{perd} \\ \dot{E}_{ENTRA} &= \dot{E}_{SALE} + \dot{E}_{perd} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 5})$$

La eficiencia simple es el cociente entre el flujo total de exergía de salida y el flujo total de exergía de entrada:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{SALE}}{\dot{E}_{ENTRA}} \quad (\text{Ec. 6})$$

**5) Análisis de las propuestas A y B, 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. Se analizaron dos propuestas:

**A)** Operar el sistema en quíntuple efecto, con extracciones de vapor vegetal de todos los efectos para calentamiento de jugo encalado. Considerar el colector de escape a 2,05 bar (121°C). Las demás condiciones del sistema CEC se mantienen sin variantes.

**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:

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

**B.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. El mismo consiste en un circuito cerrado, compuesto por dos circuitos hidráulicos independientes: el primero es el circuito de presión, accionado por la bomba eléctrica de aceite, y el segundo un circuito de

regulación por variación de la cilindrada, accionado por la bomba, que constituye el motor hidráulico. Cabe destacar que utilizando turbinas de vapor y motores hidráulicos, dicho accionamiento es controlado por medio del ajuste y regulación del flujo de trabajo a través de válvulas, que en el primer caso se trata de vapor de agua y en el segundo de aceite oleohidráulico. En la actualidad se están empleando motores oleohidráulicos, por su mejor rendimiento y confiabilidad como accionamientos de molinos de caña de azúcar en ingenios de Sudáfrica, Colombia y en un ingenio del norte de nuestro país (Golato y Paz, 2004).

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 para la empresa.

#### 6) Resolución de balances de masa, energía y exergía para las propuestas A y B. Comparación de los resultados con el caso base.

Se compararon las pérdidas de exergía obtenidas por sector y para el sistema CEC en su conjunto en las propuestas A y B con respecto al caso base. Se determinó la incidencia de la reducción de pérdidas de exergía en el consumo de vapor de calefacción.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los balances de masa y energía para el caso base, determinados empleando el software SIMCE 2.0 (López *et al.*, 2000), se muestran en la Figura 1, donde con líneas de trazos se han indicado las cajas de evaporación que operan en paralelo como un efecto. El vapor escape total requerido para las operaciones CEC alcanza las 161,3 t/h (56,9% Caña); el vapor al condensador es de 9,18% Caña y el agua requerida para el mismo asciende a 238,7% Caña.

Empleando la hoja Excel se calculó la distribución de vapor en fábrica (Fig. 2). El vapor escape total requerido para las operaciones CEC alcanza las 161,3 t/h (56,9% Caña). El vapor escape de las máquinas motrices (trapiche Krupp, ventiladores de calderas, cuchillas del Krupp, usina, trapiche Dedini) asciende a 140 t/h, siendo el vapor de laminación de 25,78 t/h (9% Caña). El vapor necesario a generar en las calderas asciende a 173,5 t/h (61,3% Caña).

De valores determinados en ensayos en calderas, se obtuvo que el rendimiento energético era del 68,8%, con un índice de generación de 1,8 kg vapor/kg bagazo. Con un 30% Caña de bagazo producido, se generan 54% Caña de vapor. Por lo tanto, el vapor a generar con combustible adicional es: 7,3% Caña de bagazo (61,3% Caña - 54% Caña). Se determina que para producir este vapor se requiere un 0,82% Caña de gas natural como combustible adicional, lo que equivale a 2323 Nm³/h.

#### Estudio y evaluación de propuestas mejoradoras

Las propuestas apuntan a disminuir las pérdidas exergéticas en los sectores estudiados (Calentamiento-Evaporación-Cristalización), logrando de esta forma la optimización en el empleo de la energía, tal como se aprecia en los resultados comparativos de la Tabla 1. Estas

# Sistema de evaporación

Caña molida: 283 t/h = 6800 t/d = 100% Caña

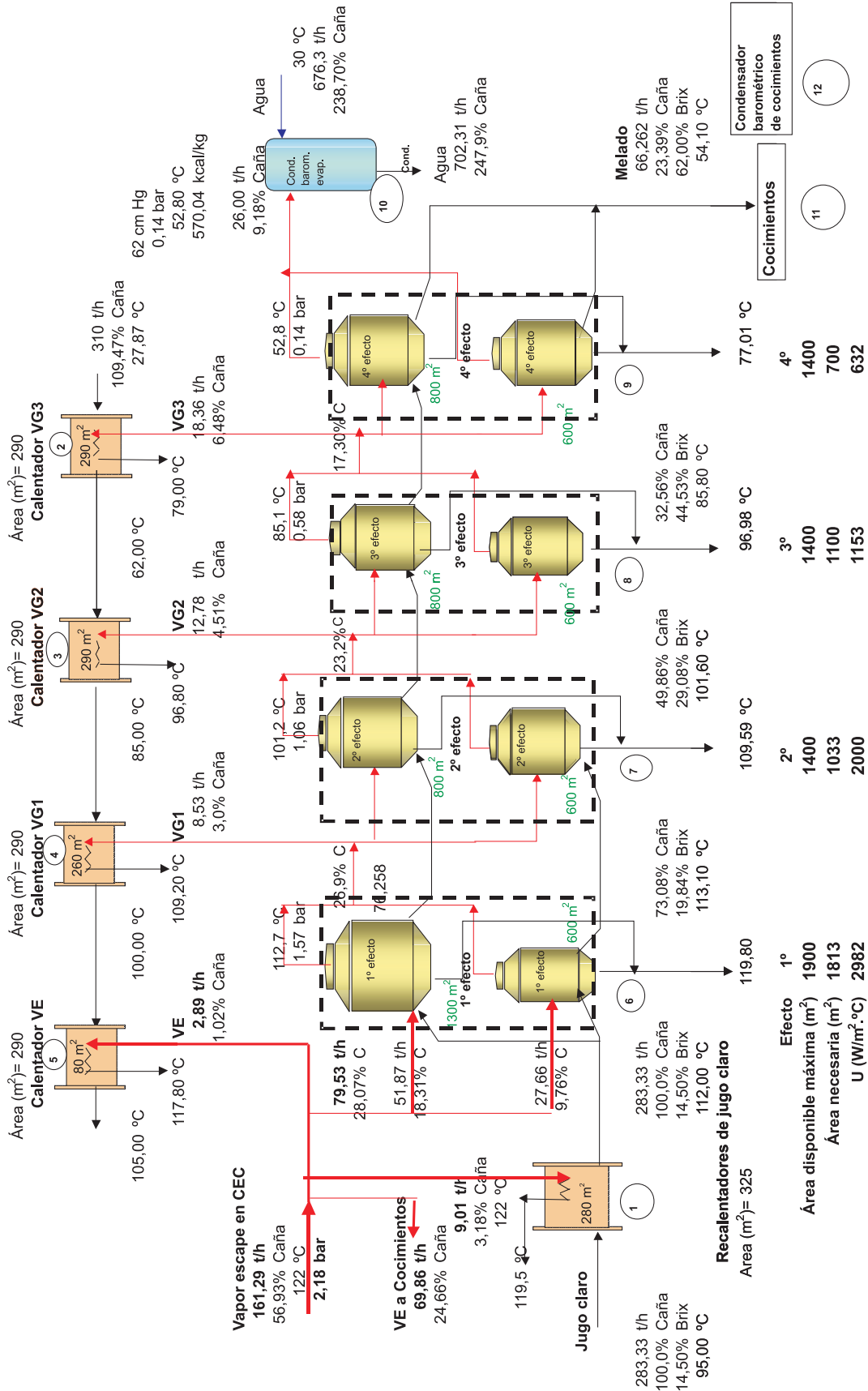


Figura 1. Caso base: resultados de los balances de masa y energía.



Tabla 1. Resultados comparativos para el caso base y las propuestas A y B.

|                                      | Caso base |        | Propuesta A   |        | Propuesta B   |        |
|--------------------------------------|-----------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|                                      | Valor     | % Caña | Valor         | % Caña | Valor         | % Caña |
| <b>Evaporación. N° de efectos</b>    | 4         |        | 5             |        | 5             |        |
| Brix melado (%)                      | 62,00     |        | 62,00         |        | 70,00         |        |
| Agua evaporada (t/h)                 | 217,07    | 76,60  | 217,07        | 76,60  | 224,64        | 79,30  |
| Vapor escape consumido (t/h)         | 79,53     | 28,10  | 56,53         | 20,00  | 103,47        | 36,50  |
| Vapor al condensador (t/h)           | 26,00     |        | 19,70         |        | 9,40          |        |
| Agua al condensador barom. (t/h)     | 676,30    | 238,70 | 510,00        | 180,00 | 243,60        | 86,00  |
| <b>Cocimientos</b>                   |           |        |               |        |               |        |
| Agua evaporada (t/h)                 | 48,18     | 0,17   | 48,18         | 17,00  | 37,42         | 13,00  |
| Agua al condensador barom. (t/h)     | 1.245,70  | 439,70 | 1.245,68      | 439,70 | 967,40        | 341,40 |
| <b>CEC</b>                           |           |        |               |        |               |        |
| Vapor de calefacción consumido (t/h) | 161,30    | 56,90  | 136,45        | 48,40  | 113,50        | 40,10  |
| Variación de vapor a CEC (%)         | 0,00      |        | <b>-15,40</b> |        | <b>-29,60</b> |        |
| <b>Calderas</b>                      |           |        |               |        |               |        |
| Vapor vivo necesario (t/h)           | 173,50    | 56,30  | 147,20        | 52,00  | 123,10        | 43,40  |
| Variación de vapor vivo (%)          | 0,00      |        | <b>-15,20</b> |        | <b>-29,10</b> |        |
| Vapor laminación (t/h)               | 25,80     | 9,10   | 0,80          | 0,30   | 4,00          | 1,40   |
| Consumo adicional de GN (% Caña)     | 2.323,30  | 0,82   | -2.872,20     | -1,00  | -5.206,00     | -1,80  |
| Ahorro de agua (t/h)                 |           |        | 192,60        |        | 761,40        |        |

acciones traen como consecuencia una reducción en el consumo de vapor en esas operaciones térmicas, que se traduce luego en una disminución del vapor de laminación requerido, y por lo tanto, del vapor vivo necesario a generar en las calderas. En el caso de esta fábrica en particular, esto significa la eliminación del uso de combustible adicional empleado (gas natural), además de un sobrante de bagazo (o su equivalente en gas natural), que puede destinarse a otros fines, con el consiguiente beneficio económico. Se observan importantes reducciones en la cantidad de agua requerida, con respecto al caso base.

A un mayor número de efectos en evaporación y mejor aprovechamiento de vapores vegetales de menor exergía, menores serán las pérdidas exergéticas en el sistema CEC, y por lo tanto, menores los requerimientos de vapor.

### Balances de exergía

A modo de ejemplo, en la Figura 3, se muestran los resultados del cálculo para el 1° efecto de evaporación (Bloque 6) del caso base, usando Excel.

Siguiendo esta metodología se calcularon los balances en cada bloque, y luego en cada sector del proceso. En la Tabla 2 se muestran los valores determinados de: exergía de entrada, exergía de salida, exergía perdida y la eficiencia exergética para los diferentes sectores del caso base.

Puede observarse que las menores eficiencias exergéticas ocurren en los condensadores barométricos, seguido por el sector de cristalización y la estación de evaporación.

Estas pérdidas están asociadas al proceso de transferencia de calor a través de una diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) finita.

Las mayores irreversibilidades se producen en el sector de cristalización, por tratarse de una operación similar a un evaporador de simple efecto con  $\Delta T$  alto ( $\Delta T = 62^\circ\text{C}$ ), ya que opera a bajas temperaturas ( $60^\circ\text{C}$ ) y está calefaccionado con vapor escape de  $122^\circ\text{C}$ .

De la exergía total suministrada al sistema CEC, un 84,1% corresponde a la exergía del vapor de calefacción, y sólo un 9,6% a la exergía de motores (exergía eléctrica). Aproximadamente un 71,8% ( $100\% - 28,2\%$ ) de la exergía suministrada se pierde por las irreversibilidades de los procesos. Este es un hecho que el análisis convencional, realizado con la 1ª ley de la Termodinámica, no es capaz de detectar.

En la Figura 4 se muestra un gráfico de barras com-

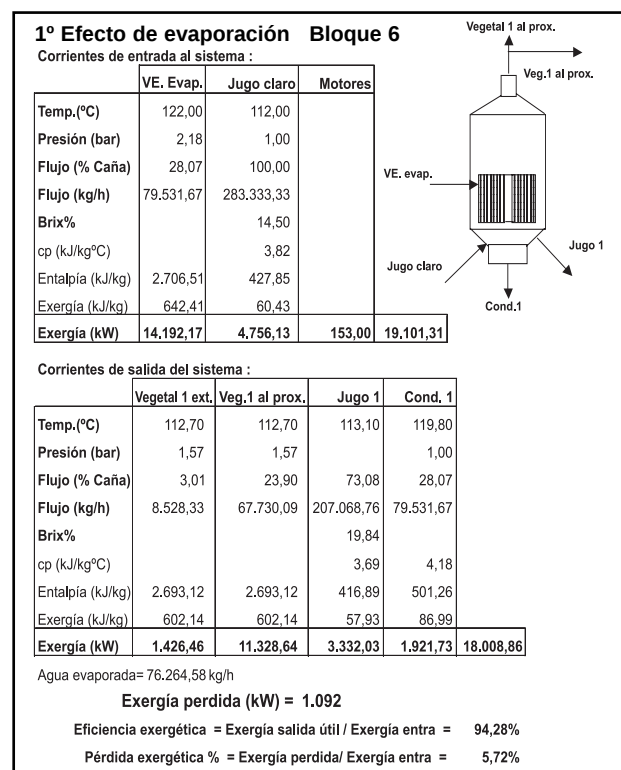


Figura 3. Resultados del balance de exergía para el bloque 6 (caso base).

Tabla 2. Flujos de exergía y eficiencia exergética para las diferentes etapas del caso base.

| Etapas                    | Exergía entrada (kW) | Exergía salida (kW) | Pérdida de exergía (kW) | Eficiencia exergética (%) |
|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| Calentamiento JE          | 8.787                | 5.477               | 3.310                   | 62,3                      |
| Calentamiento JC          | 5.402                | 4.973               | 429                     | 92,1                      |
| Sistema de evaporación    | 19.194               | 12.529              | 6.665                   | 65,3                      |
| Condensador barom. evap.  | 2.336                | 811                 | 1.525                   | 34,7                      |
| Sector cocimientos        | 13.902               | 5.719               | 8.183                   | 41,1                      |
| Condensador barom. cocim. | 4.996                | 1.494               | 3.502                   | 29,9                      |
| <b>Total CEC</b>          | <b>34.221</b>        | <b>9.651</b>        | <b>24.569</b>           | <b>28,2</b>               |

parativo de las pérdidas de exergía en los diferentes sectores del sistema CEC para el caso base y las propuestas A y B. Sobre las barras se especifica la variación porcentual de las pérdidas respecto al caso base.

Las disminuciones de exergía perdida en el sistema CEC se traducen en un menor requerimiento de vapor de calefacción para esas operaciones, tal como se observa en la Tabla 3. La reducción porcentual de irreversibilidades en el

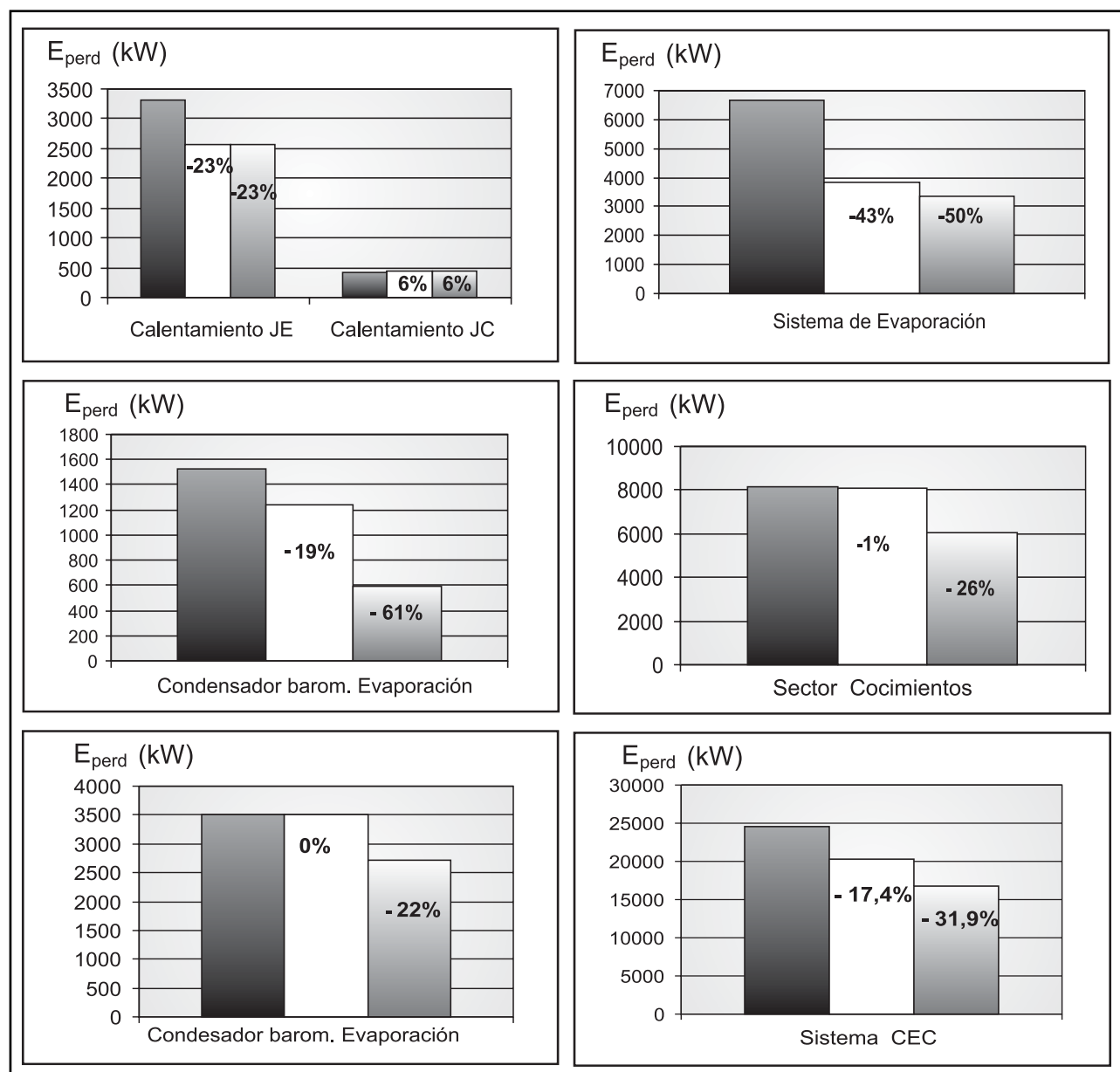


Figura 4. Pérdidas de exergía en los diferentes sectores del CEC. Caso base ■; propuesta A □ y propuesta B ▒.

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 calor en las propuestas A y B.

### Diagramas de Grassman

En la Figura 5 se comparan en una misma escala

los Diagramas de Grassman para el caso base y la propuesta B. Se observan claramente la disminución de exergía perdida (flechas negras) y la reducción del consumo de vapor escape (VE) necesario para calefactar las operaciones CEC, en la propuesta B respecto del caso base.

En la misma figura, en un diagrama de torta, se han esquematizado las variaciones de exergía perdida (% respecto al caso base) que han experimentado los diferentes sectores del sistema CEC entre ambos esquemas: calentamiento de JC: 6%; calentamiento de JE: -23%; evaporación: -50%; condensador de evaporación: -61%; cristalización: -26% y

Tabla 3. Pérdidas de exergía y consumo de vapor en los sistemas CEC del caso base y las propuestas A y B.

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

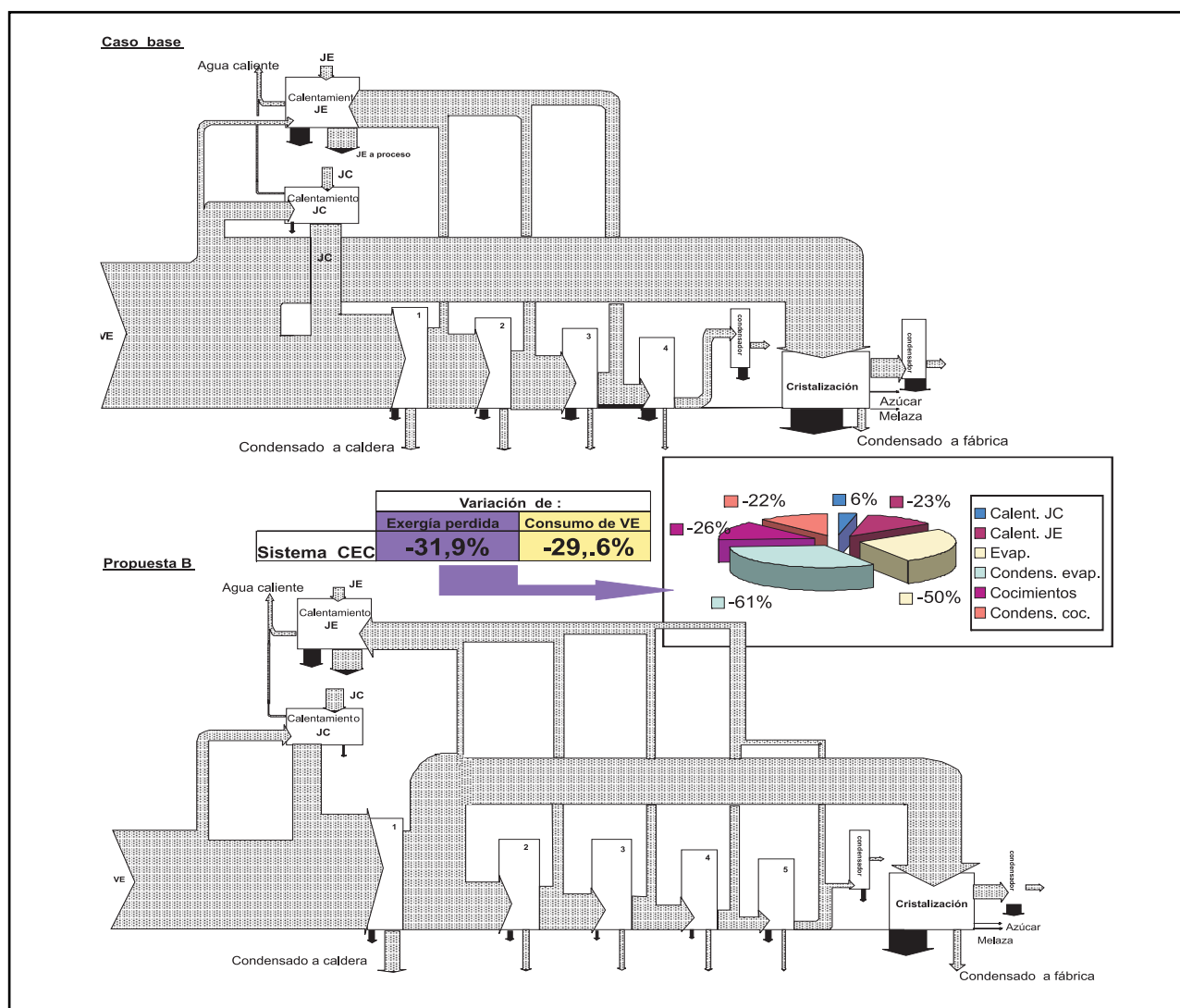


Figura 5. Diagramas de Grassman para el caso base y la propuesta B.

condensador de cristalización: -22%.

Estas reducciones de irreversibilidades en las diferentes etapas de Calentamiento-Evaporación-Cristalización han permitido que el sistema CEC de la propuesta B reduzca sus pérdidas de exergía en un 31,9% respecto del caso base.

### CONCLUSIONES

- Los modelos matemáticos del software SIMCE 2.0, empleado para realizar los balances de masa y energía de sistemas CEC, resultaron adecuados para analizar sistemas CEC de compleja configuración.
- La determinación de las pérdidas de exergía en los diferentes sectores que componen el sistema CEC, permitió descubrir en qué etapas se producían las mayores pérdidas y proponer acciones tendientes a su disminución. Este hecho no puede ser deducido a partir de la 1ª ley de la Termodinámica.
- Las menores eficiencias exergéticas se producen en el condensador barométrico de cristalización, seguido por el condensador barométrico de evaporación y por el sector de cristalización.
- Se observan altas pérdidas de exergía en el sector de cristalización (cocimientos), en el sistema de evaporación en conjunto, en el calentamiento global de jugo encalado y en los condensadores barométricos.
- Los condensadores barométricos de evaporación y cristalización presentan una baja eficiencia exergética ( $\cong 30\%$ ), la que se mantiene constante en las propuestas analizadas, lo que indica que se pierde alrededor del 70% de la exergía que entra a los mismos. En las propuestas A y B se logra disminuir las pérdidas de exergía en el condensador, mediante la reducción del flujo de vapor que llega al mismo, con lo que disminuyen también el caudal de agua de ingreso y la potencia requerida por la bomba; lo que equivale a reducir la exergía de entrada al condensador.
- Al analizar el sistema CEC en conjunto se observan importantes disminuciones de exergía perdida en la propuesta A: 17,4% respecto del caso base, y 31,9% en la propuesta B; lo mismo sucede con la eficiencia exergética del sistema CEC, que crece 18,8% en la propuesta A y 44,7% en la propuesta B, respecto del caso base.
- Las disminuciones de exergía perdida en el sistema CEC se traducen en un menor requerimiento de vapor de calefacción para esas operaciones. La reducción porcentual de irreversibilidades 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 calor en las propuestas A y B.
- El consumo de vapor en CEC se reduce en igual proporción que la exergía perdida total en el sistema, y por consiguiente en el caso extremo ideal de proceso

reversible (infinitos efectos con  $\Delta T$  tendientes a 0), tanto la exergía perdida como el consumo de vapor tenderían a cero. La reducción de pérdidas de exergía en las propuestas A y B permite eliminar el combustible adicional en calderas bagaceras de tecnología antigua, como las de este ingenio, y además contar con un sobrante de bagazo (o su equivalente en gas natural, A: 1% Caña; B: 1,8% Caña), para otros fines.

- Para lograr reducciones en las pérdidas de exergía de sistemas CEC, es necesario efectuar inversiones de capital que, en los casos analizados, consisten en aumentar las superficies de intercambio de calor y reemplazar equipos ineficientes, hechos que no aumentan la capacidad de la instalación, pues se seguirá realizando el mismo trabajo, sino que solamente ahorran exergía y por consiguiente energía valiosa.
- El sistema CEC en operación en este ingenio en la zafra 2001-2002 puede ser mejorado exergéticamente mediante: aumento del número de efectos de evaporación, empleo de vapores vegetales de todos los cuerpos de evaporación para calentamiento de jugo, aumento en la concentración de melado y calefacción del sector de cocimientos con vapores vegetales del 1º efecto.
- La sustitución de turbinas de vapor por motores oleohidráulicos para el accionamiento de molinos es una alternativa novedosa, de reciente empleo en la industria azucarera de caña y aún sin aplicaciones concretas en los ingenios de Tucumán.

### BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Anaya, A. y R. Rivero. 1988.** Aplicación del análisis exérgico para la optimización del uso de la energía en plantas industriales. Ingeniería Química 11: 11-18.
- Baloh, T. and E. Wittwer. 1995.** Energy manual for sugar factories. 2. ed. Bartens, Berlin, Alemania.
- Brodyanskii, V. M. 1973.** Exergy method of thermodynamic analysis. Energiya, Moscú, Rusia (2): 10-14.
- Fernández P., M. I. e S. A. Nebra. 2001.** Comparação do desempenho do processo de evaporação a través de uma análises de custo exergético. En: Actas del Congreso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM 2001, Brasil, pp. 10-14.
- 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.
- Guallar, J. 1987.** Análisis exergético e integración térmica de procesos en la industria azucarera. Tesis doctoral inédita. Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, España.
- Kotas, T. J. 1985.** The exergy method of thermal plant analysis. Butterworths, London, England.
- López, A. O.; D. Paz; O. A. Díez y G. J. Cárdenas. 2000.** SIMCE 2.0: nuevo software para el análisis de sistemas de calentamiento, evaporación y cocimientos de la industria azucarera. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 77 (1): 89-98.
- Paz, D. y G. J. Cárdenas. 1997.** Análisis exergético de un sistema de calentamiento-evaporación-cocimiento en la industria azucarera de caña. International Sugar Journal 99 (1182): 263-268, 317-320.

- Rant, Z. 1956.** Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit"= Exergy, a new word for "technical work capacity". *Forsch. Gebiete Ingenieurwes* (2): 67-71.
- Rivero, R. 1994.** El análisis de exergía. *Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ)* (11): 14-27.
- Tsatsaronis, G. 1984.** Combination of exergetic and economic analysis in energy conservation processes. In: *Proc. of the European Congress on Economics and Management of Energy in Industry*, 8, Lisboa, Portugal, pp. 55-58.
- Valero, A.; M. A. Lozano and M. Muñoz. 1986.** A general theory of exergy saving. I: On the exergetic cost. II: On the thermoeconomic cost. III: Energy saving and Thermoeconomics. *ASME Book, W.A.M.* (2-3): 15-26.
- Vallejo, E. 1982.** El concepto de exergía y su aplicación a la industria azucarera. *Boletín EEAO* (137).
-