

## ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR CRUDO

### EXERGY ANALYSIS OF SUGAR PRODUCTION PROCESS

Jagni Cabrera Hernández<sup>1\*</sup>, Yannay Casas Ledón<sup>2</sup>, Leidy de la Cruz Pérez<sup>3</sup> y  
Luis E. Arteaga Pérez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Filial Universitaria de Quemado de Güines. Villa Clara, Cuba

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 y ½ Santa Clara, Cuba

<sup>3</sup> Empresa azucarera: Panchito Gómez Toro, Quemado de Güines, Villa Clara, Cuba

<sup>4</sup> Unidad de Desarrollo Tecnológico. Universidad de Concepción. Av. Cordillera 2634. Parque Industrial Coronel. Coronel. Concepción. Chile.

Recibido: Abril, 23, 2014; Revisado: Mayo 28, 2014; Aceptado: Junio 6, 2014

### RESUMEN

En el presente artículo se evalúa el proceso de producción de azúcar crudo mediante la aplicación del análisis exergético, con el objetivo de identificar y cuantificar las etapas de mayores ineficiencias termodinámicas. Se tomó como base de estudio el proceso de producción de azúcar de Panchito Gómez Toro durante la zafra 2013.

El proceso de producción de azúcar se describe fundamentalmente en siete etapas (recepción y molienda, calentamiento, clarificación, calentamiento de jugo clarificado, evaporación, cocción -cristalización y cogeneración), para las cuales se determinaron las pérdidas por irreversibilidades. Además se determinaron la eficiencia exergética e irreversibilidades totales del proceso. Se evaluaron los efectos de las mejoras tecnológicas (caso mejorado) sobre los indicadores exergéticos (eficiencia exergética e irreversibilidades) y se comparó con el proceso tradicional de azúcar (caso base).

La eficiencia exergética del proceso (caso base) es de 23,94% y la irreversibilidades ascienden a 306 MW, siendo la etapa de cogeneración y recepción y molienda las de mayores irreversibilidades, las cuales representan el 35 y el 34% respectivamente de total. El sistema de mejoras propuesto muestra efectos positivos sobre el análisis exergético, incrementándose la eficiencia en 1,77% y reduciéndose las irreversibilidades en 1432 kW.

**Palabras clave:** eficiencia exergética, irreversibilidades, producción de azúcar

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Jagni Cabrera, Email: [jaqui@uclv.edu.cu](mailto:jaqui@uclv.edu.cu)

**ABSTRACT**

In the present paper, the study of sugar production process by means of exergy analysis was carried out, with the purpose of identifying and quantifying the stages with higher thermodynamic inefficiency. The sugar process of Panchito Gómez Toro during the 2013 sugarcane harvest period was taken as reference case.

The sugar production process is integrated by the following stages: reception and mills, heating, clarification, heating of clarified juice, evaporation, crystallization and centrifugation and cogeneration. The destruction by irreversibility for each stage involve in the process were calculated. Furthermore total exergy efficiency and irreversibility of sugar process was determined. On the other hand, the influence of technologic improvements (improvements case) on exergetic indicators (exergy efficiency and irreversibility) was evaluated and the comparison with base case was done.

The total exergy efficiency and irreversibility of sugar production process take values of 23.94% and 306 MW, respectively. The cogeneration and reception and mills stages showed the higher destruction by irreversibility, which represents 35 and 34% of total losses, respectively.

The improvements system proposed has a positive influence on exergy analysis. The exergy efficiency is incremented in 1.77% and the irreversibility is reduced in 1432 kW.

**Key words:** exergy efficiency, irreversibility, sugar process.

***Nomenclatura***

$C_p$	Capacidad calorífica ( $\text{kJ kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$S$	Entropía molar absoluta ( $\text{kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$e_i^{ch}$	Exergía química de las especies $i$ ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )	$S_o$	Entropía molar en el estado de referencia ( $\text{kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$e_i^o$	Exergía química estándar de las especies ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )	$T_j$	Temperatura del componente $j$ (K)
$e_i^{ph}$	Exergía física de las especies ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )	$VCI$	Valor calórico inferior ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
$E$	Exergía total de la corriente (kW)	$v_m$	Volumen específico ( $\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ )
$H$	Entalpía molar absoluta ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$W$	Humedad del bagazo (%)
$H_o$	Entalpía molar en el estado de referencia ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	$x$	Fracción molar de las especies (%)
$I$	Irrevesibilidades (kW)	$Y$	Fracción molar del solido en soluciones azucaradas (Brix)
$Q_j$	Utilidades de calor de los componentes $j$ (kW)	$z$	Fracción másica de las especies (%)
$R$	Constante universal de los gases ( $\text{kJ K}^{-1}\text{Kmol}^{-1}$ ).		

<i>Símbolos griegos</i>	<i>Subíndice</i>
$ex$ Eficiencia exergéticos (%)	$f$ Combustible
Relación exergía–energía	$0$ Estado de referencia
Densidad específica ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$p$ Producto

## 1. INTRODUCCIÓN

El modelo de consumo impuesto a la humanidad, soportado en el uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), ha hecho surgir una crisis medioambiental y energética sin precedentes. El negativo impacto ambiental que trae implícito el uso de dichos recursos, se refleja en el agravamiento del efecto invernadero por la emisión de gases nocivos ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), la elevación de la temperatura media de la tierra, la reducción del área cultivable, la desaparición de fuentes de agua potable, entre otros fenómenos que comprometen la existencia humana. Debido a esto, numerosos investigadores han dirigido sus esfuerzos a la búsqueda de fuentes de energía sostenible y renovable, y el desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías para la producción, así como el mejoramiento de las tecnologías existentes.

Considerando este último aspecto, la industria de la caña de azúcar presenta elevado potencial de mejora Casas (2012), teniendo en cuenta su estado de deterioro. La identificación de las áreas de mayores consumos energéticos, de insumos y combustibles puede contribuir a establecer un plan de mejoras tecnológicas, traducándose en el incremento de la producción de electricidad a la red nacional (Alonso et al., 2008), así como la eficiencia y sostenibilidad de dicha industria teniendo en cuenta el carácter renovable de la caña de azúcar.

Numerosas son las herramientas utilizadas para la evaluación de los procesos químicos. En este contexto el análisis exergético ha sido ampliamente utilizado en la industria de procesos con el fin de localizar e identificar las causas de la destrucción y/o las pérdidas de exergía así como cuantificar su magnitud (Gong y Wall, 2000; Wall y Gong, 2001 y Rosen y Dincer, 2001). Esto permite centrar la atención en aquellos aspectos de la operación del sistema analizado, los que ofrecen mayores oportunidades de mejora para el uso eficiente de la energía y los recursos. Además, todos los efectos ambientales asociados con emisiones y su disminución pueden ser expresados en términos físicos.

Muchos autores han centrado sus estudios en la aplicación de los balances exergéticos a diferentes industrias; tal es el caso de Wall, (1986). El mismo determina la Exergía de las corrientes y las pérdidas exergéticas de cada etapa del proceso para la industria de producción de papel y producción de aceros. Dewulf, (2001) es uno de los investigadores que realiza el análisis exergético en sistemas de tratamientos de residuos gaseosos. La industria azucarera y sus derivados no han estado exentos de dichos estudios, en este sentido los investigadores se han centrado en la evaluación y comparación de sistemas de evaporación (Ram y Banerjee, 2003), optimización exergo económica de la red de intercambiadores de calor (Ensina, 2007), identificación de las irreversibilidades de la integración del proceso azúcar y etanol (Ensina, 2009), impactos de las modificaciones de etapa de cogeneración con bagazo sobre la eficiencia

exergética del proceso y los costos de producción del azúcar y el etanol (Pelligrini, 2010). Además análisis exergéticos han sido aplicado a la gasificación de bagazo (Pellegrini, 2005) y su integración con celdas combustible oxido sólido (SOFC) para la producción de electricidad (Arteaga, 2013).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente el objetivo del presente artículo es evaluar el proceso de producción de azúcar crudo a través del análisis exergético, tomando como base la industria azucarera Panchito Gómez Toro, localizada en el municipio de Quemado de Güines.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Análisis de Exergía

El análisis exergético es un método termodinámico que usando principalmente la conservación de masa y energía junto con la segunda ley de la termodinámica se usa para diseñar y evaluar procesos químicos.

Según Kotas (1995) y (Rosen y Dincer, 2001), la exergía es el trabajo máximo que puede ser producido por un sistema o una corriente hasta alcanzar el estado de equilibrio con el medio ambiente. En este estudio se asume como estado de referencia la temperatura de  $T_0 = 298,15$  K, presión  $P_0 = 1,013$  bar y la composición atmosférica de 75,67 %  $N_2$ , 20,35 %  $O_2$ , 0,03 %  $CO_2$ , 3,03 %  $H_2O$  y 0,92 % Ar.

En el presente artículo, el valor de exergía de las corrientes de materiales es expresado como la suma de dos componentes las exergías física y química. Las exergías cinética y potencial se desprecian para el análisis de los procesos industriales, y la exergía de la electricidad es igual a la energía en correspondencia con lo planteado por (Dewulf et al., 2007).

La exergía física es el trabajo obtenido por un proceso reversible desde su estado inicial (T, P) hasta el estado de referencia ( $T_0$ ,  $P_0$ ), la misma fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$e_i^{ph} = \sum (H - H_0)_i - T_0 \cdot (H - H_0)_i \quad (1)$$

Para las corrientes materiales en estado gaseoso involucradas en el proceso se considera la capacidad calorífica isobárica constante ( $C_p$ ) y se da en ( $J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$ ), quedando la expresión anterior de la siguiente forma:

$$e_i^{ph} = C_p \cdot \left\{ (T - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right\} + R \cdot T_0 \cdot \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2)$$

Donde R: es la constante de los gases ( $8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Para las corrientes líquidas que intervienen en el proceso se asumió también la capacidad calorífica constante ( $C_p$ ) calculándose la exergía mediante la siguiente expresión:

$$e_i^{ph} = C \cdot \left\{ (T - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right\} - v_m \cdot (P - P_0) \quad (3)$$

Donde  $v_m$ : es el volumen específico real ( $\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ) y C es el calor específico de la mezcla líquida ( $\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ).

El volumen específico de la mezcla líquida se puede determinar por la ecuación (4), donde  $\rho$  es la densidad específica ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

$$v_m = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

La exergía química es el trabajo obtenido al tomar una sustancia desde  $P_0$  hasta el estado de equilibrio termodinámico con las concentraciones de los componentes de la referencia. Para una corriente gaseosa, asumiendo comportamiento ideal, la exergía química ( $e_i^{ch}$ ) de todas las especies es dada por la siguiente ecuación:

$$e_i^{ch} = \sum x_i \cdot e_i^0 + R \cdot T_0 \sum x_i \cdot \ln(x_i) \quad (5)$$

La exergía química estándar ( $e_i^0$ ) de cada elemento se tomó de Szargut (2005),  $x_i$  es la fracción molar. Dicha expresión también es aplicable para las soluciones líquidas con comportamiento ideal.

La exergía de las soluciones azucaradas a diferentes condiciones de temperatura y concentración (jugo mezclado, jugo clarificado, jugo concentrado, meladura, miel final, miel A, miel B, y torta del filtro a 3°B<sub>x</sub>) son estimadas utilizando el método de cálculo propuesto por (Nebra y Fernández, 2005), usando la siguiente ecuación.

$$e_{sol-azucarada}^{ch} = y_{sacarosa} \cdot e_{sacarosa}^0 + y_{agua} \cdot e_{agua}^0 \quad (6)$$

Donde  $y_{sacarosa}$  y  $y_{agua}$  son la fracción molar de sólidos,  $e_{sacarosa}^0$  y  $e_{agua}^0$  son referidas a exergía estándar de la sacarosa y del agua respectivamente. La exergía química estándar ( $e_{sacarosa}^0=6007800$  kJ/kmol y  $e_{agua}^0= 900$  kJ/kmol) fueron tomadas de Szargut (2005). El valor de la exergía química del bagazo se calculó por el método de exergía propuesto por (Szargut J, 2005):

$$e_{bagazo}^{ch} = \beta \cdot VCI_{bagazo} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1.0412 + 0.216 \frac{Z_{H_2}}{Z_c} - 0.2499 \frac{Z_{O_2}}{Z_c} [1 + 0.7884 \frac{Z_{H_2}}{Z_c}] + 0.045 \frac{Z_{N_2}}{Z_c}}{1 - 0.3035 \frac{Z_{H_2}}{Z_c}}, \text{ for } \left[ \frac{Z_{O_2}}{Z_c} \leq 2.67 \right] \quad (8)$$

Donde  $Z_{H_2}$ ,  $Z_{O_2}$ ,  $Z_{N_2}$ ,  $Z_c$  son fracciones másica del hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono respectivamente expresadas en porcentajes (%).

La composición elemental del bagazo de 47% C, 6,5% H, 2,5% A, 49,2% W y 44% O y un valor calórico inferior (VCI) = 1863,8 kcal/kg, calculado según (Hugot E, 1986) y Espinosa (1990) por la ecuación siguiente:

$$VCI_{bagazo} = 4250 - 4850 \cdot W \quad (9)$$

La exergía del calor transferido a un sistema, a una temperatura T, se determina a través de la ecuación siguiente:

$$E_Q = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) Q_j \quad (10)$$

Para demostrar la eficacia del uso de los recursos y su transformación en productos se determina la eficiencia exergética total ( $e_{ex}$ ) del proceso, según la ecuación (11). La misma se define como la relación entre la exergía contenida en los productos y la exergía contenida en los combustibles.

En el presente artículo se consideran como productos ( $E_p$ ): azúcar, bagazo sobrante, miel final y la electricidad entregada a la red nacional y como combustibles ( $E_f$ ): caña, insumos de la etapa de purificación (floculante y lechada de cal), agua de reposición y aire alimentado a caldera.

$$\eta_{ex} = \frac{E_p}{E_f} \quad (11)$$

En el presente trabajo todas las corrientes de entrada y salida son consideradas para determinar la distribución de irreversibilidades (I), que incluye la suma de masa, energía y potencia. Estas dan la medida de la exergía degradada, se obtienen como la diferencia entre la exergía que entra al proceso o etapa y la que sale de la misma.

$$I = E_p - E_f \quad (12)$$

### **2.1 Descripción del caso base**

El caso base cuenta con una molida horaria de 158,20 t/h, con un rendimiento de 0,11 ton de azúcar / ton de caña, 3,5 t de miel / ton de caña y un exceso de bagazo del 22,3% del total obtenido.

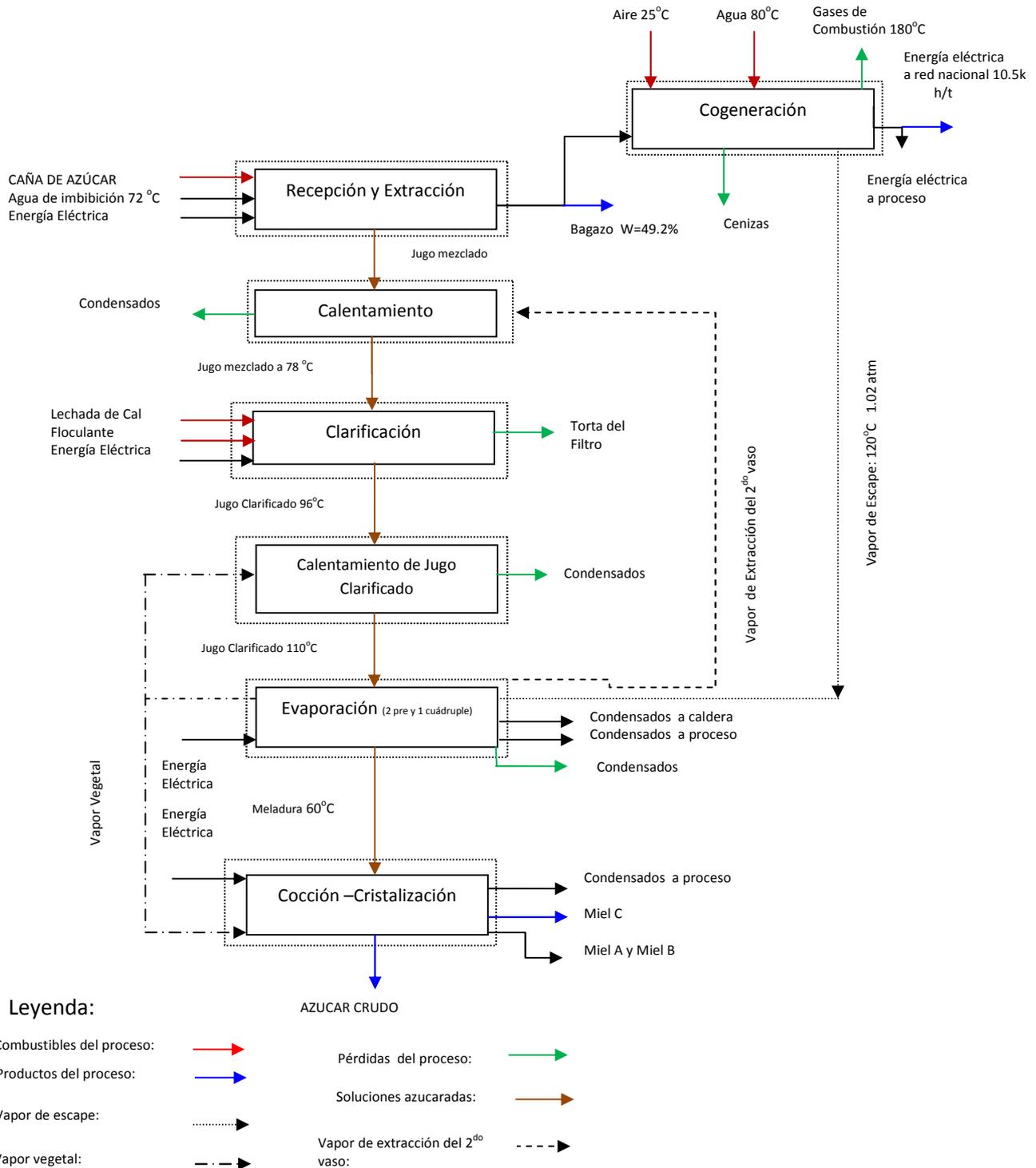
El proceso fue dividido para su análisis en siete etapas como se puede ver en la figura 1, y los datos fueron completados usando los balances de masa y energía.

Se consideran las etapas de: recepción y molienda, calentamiento, clarificación, calentamiento de jugo clarificado, evaporación, cocción -cristalización y cogeneración.

Para la generación de vapor de alta presión (17 atm y 320°C) en las calderas se utiliza bagazo con 49,2% de humedad (W) y 60% de aire en exceso, obteniéndose los gases de combustión, que por el color de la llama se puede estimar que estos salen a 180 °C. El agua que se utiliza para producir el vapor en las calderas es la que se condensa del vapor de escape en los pre-evaporadores y los dos primeros vasos del múltiple-efecto, que entra a la caldera a 80 °C.

La presión del vapor obtenido en la caldera es reducida en dos turbo-generadores (4 MW y 2 MW); produciendo electricidad (37 kW-h/t<sub>caña</sub>), la que es usada en el propio proceso de producción de azúcar (0,9MW-h/t<sub>caña</sub>) y el excedente es entregado a la red nacional (10,5kW-h/t<sub>caña</sub>).

El vapor de escape del turbo (120 °C y 1,02 atm) es utilizado por el pre-evaporador y los calentadores rectificadores, y el vapor de estos, para alimentar al múltiple efecto, tachos, calentador rectificador y calentador de jugo clarificado y se le hace una extracción de vapor al segundo baso del múltiple y se envía a los calentadores primarios.



**Figura 1.** Diagrama de bloques general del proceso tradicional de azúcar crudo (*caso base*)

Los parámetros adoptados en caso base se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros utilizados para la simulación del caso base

<b>Etapas</b>				
<b>Recepción y molienda (I)</b>	<b>m (kg/s)</b>	<b>p (kPa)</b>	<b>t (°C)</b>	<b>E (kW)</b>
Caña de azúcar	58,5	298	101	310055
Agua de imbibición	11,7	345	101	45848
Jugo Mezclado	41,1	311	101	107598
Bagazo	14,5		101	144422
Electricidad				1456
<b>Calentamiento (II)</b>				
Jugo Mezclado	41,1	311	101	107598
Vapor vegetal	1,8	393	17	14109
Vapor de extracción	2,8	363	17	11304
Jugo Mezclado Caliente	41,1	376	101	1054
Condensados de extracción	2,8	363	17	11304
Condensados de vegetal	1,8	393	17	14109
<b>Purificación (III)</b>				
Jugo Mezclado Caliente	41,1	376	101	1054
Floculante	1.7*10 <sup>-4</sup>	298	101	420
Lechada de Cal	0,6	298	101	1255
Agua de Lavado	30,6	298	101	1528
Torta del Filtro	4,2	298	101	2404
Electricidad				1000
Jugo Clarificado	37,56	369	101	99385
<b>Calentamiento (IV)</b>				
Jugo Clarificado	37,6	369	101,3	99385
Vapor vegetal	0,9	383	16,80	5899
Condensados	0,9	350	101,30	2731
<b>Evaporación (V)</b>				
Jugo Clarificado Caliente	37,6	383	101	99558
Vapor de Escape	9,1	393	101	73713
Electricidad				750
Vapor de extracción	2,8	363	17	11304
Vapor vegetal	28,5	383	127	510
Meladura	8,4	273	55	92108
Condensados del pre	9,09	388	101,3	489,30
<b>Cocción- Cristalización -Centrifugación (VI)</b>				
Meladura	8,4	273	55	92108
Vapor vegetal	2,92	387	127	8300
Electricidad				370
Miel B	2,22	298	101	10827
Miel C	2,09	298	101	32849
Miel A	4,53	298	101	11212
Azúcar	0,45	298	101	7949
Condensados a caldera	2,92	363	127	37889
<b>Cogeneración(VII)</b>				
Agua a caldera	35.62	323	101	2378.51

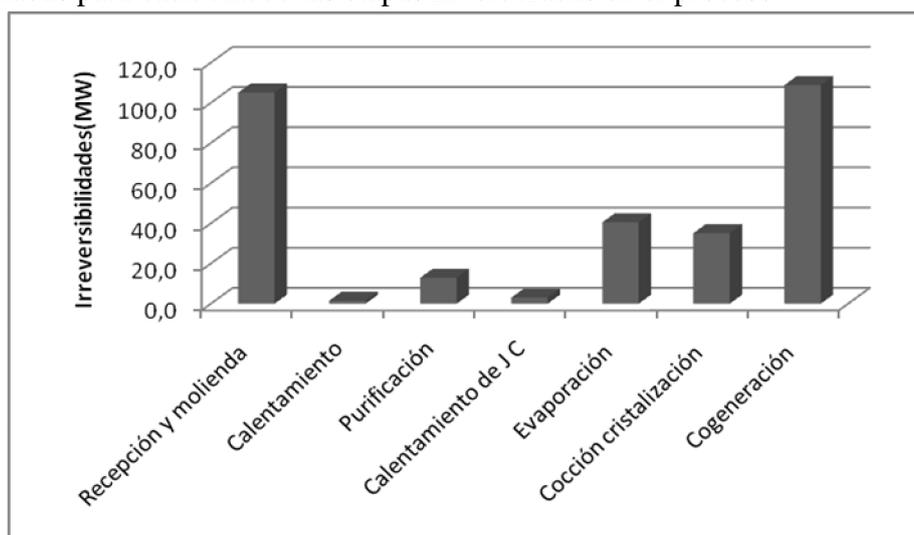
Aire	70,20	298	101,3	4719,17
Vapor de escape	35,6	393	103	26481
Gases	85,2	478	101	16900
Cenizas	0,1	298	101	35
Bagazo	10,5	298	101	104271
Electricidad que consume				471
Electricidad que produce				6000
Electricidad que entrega				16865,41

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis exergético realizado fueron determinadas las eficiencias exergéticas y las irreversibilidades totales del proceso, así como las irreversibilidades de cada etapa.

La eficiencia exergética total, es una medida de cuán eficiente es el uso de los recursos en el proceso, en este escenario solamente el 23,94% de la exergía de los recursos usados son transformados en producto. Aproximadamente el 76% son pérdidas por irreversibilidades y la exergía contenida en las corrientes residuales (gases de combustión, cenizas, agua residual, torta del filtro), representa solamente el 6% de la exergía que entra.

En la Figura 2 se muestran los resultados de las pérdidas por irreversibilidades determinadas para cada una de las etapas involucradas en el proceso.



**Figura 2.** Irreversibilidades por etapas del caso base

Las irreversibilidades totales del proceso representan el 70% (307 MW) de la exergía consumida, siendo la etapa de cogeneración la de mayores incidencias coincidiendo con lo reportado por Pellegrini y Oliveira, (2010). Las irreversibilidades de esta etapa representan el 35% del total. Las mismas están asociadas principalmente a la transformación química del bagazo, a las bajas temperaturas de entrada del agua y del aire al quemador y a las altas temperaturas de salida de los gases de combustión. La disminución de la temperatura de los gases que salen de la chimenea en 30°C trae consigo la reducción de las pérdidas de calor de dichos gases en 30kcal/kg de bagazo, lo cual se traduce en una disminución de las pérdidas exergéticas en 762 kW.

El ineficiente aislamiento en la línea de vapor directo también influye en las altas pérdidas de la cogeneración. Dichas pérdidas alcanzan valores de 534 kW, esto

implicaría un consumo adicional de bagazo, para suplir la demanda de vapor del proceso. Por otra parte el deterioro de las bombas de agua y los ventiladores de tiro forzado a la caldera trae consigo un sobre consumo de electricidad en dicha etapa, lo que implica un incremento en las pérdidas y disminución del uso eficiente de los recursos.

La etapa de recepción y molienda también muestra importantes contribuciones sobre las irreversibilidades, representando el 34% de las irreversibilidades totales del proceso, similar a la etapa de cogeneración. Este fenómeno se asocia a los altos consumos de energía eléctrica (35% de la energía eléctrica consumida) de los motores que mueven los molinos y los motores de las esteras. Sin embargo estos altos consumos de electricidad son índices tradicionales y característicos para molinos electrificados según plantea Ensina y col, (2009). El sobre consumo de electricidad en las esteras de caña surtidora y estera de caña elevadora debido a su deterioro mecánico es la variable de mayor incidencia sobre las irreversibilidades de esta etapa.

Las etapas de evaporación y cocción–cristalización también muestran pérdidas notables, las cuales alcanzan valores de 13% y 9% respectivamente, valores inferiores que las etapas de cogeneración y recepción y molienda. Estas irreversibilidades están asociadas a los elevados consumos de vapor de escape utilizados como fuente de calor para concentrar el jugo clarificado de 14 Brix a 60 Brix y los consumos de potencia de cristalizadores y centrifugas para la culminación del grano de azúcar así como su separación de la miel final.

### **3.1. Sistema de mejoras tecnológicas**

De acuerdo con las principales ineficiencias detectadas en el proceso de producción de azúcar y los criterios aportados por un grupo de expertos, se propusieron un sistema de mejoras dirigidas a disminuir los consumos energéticos y las pérdidas de calor, las cuales se traducen a un incremento en el bagazo sobrante y electricidad entregada a la red nacional. En este sentido las mejoras están concentradas en las etapas de mayores irreversibilidades (cogeneración y de recepción y molienda).

Las mejoras evaluadas son de carácter mecánico (M1) (soluciones a corto plazo y solubles por la propia fábrica según criterios de expertos) y tecnológico (M2 y M3) (soluciones que requieren de inversiones), dichas mejoras se describen a continuación:

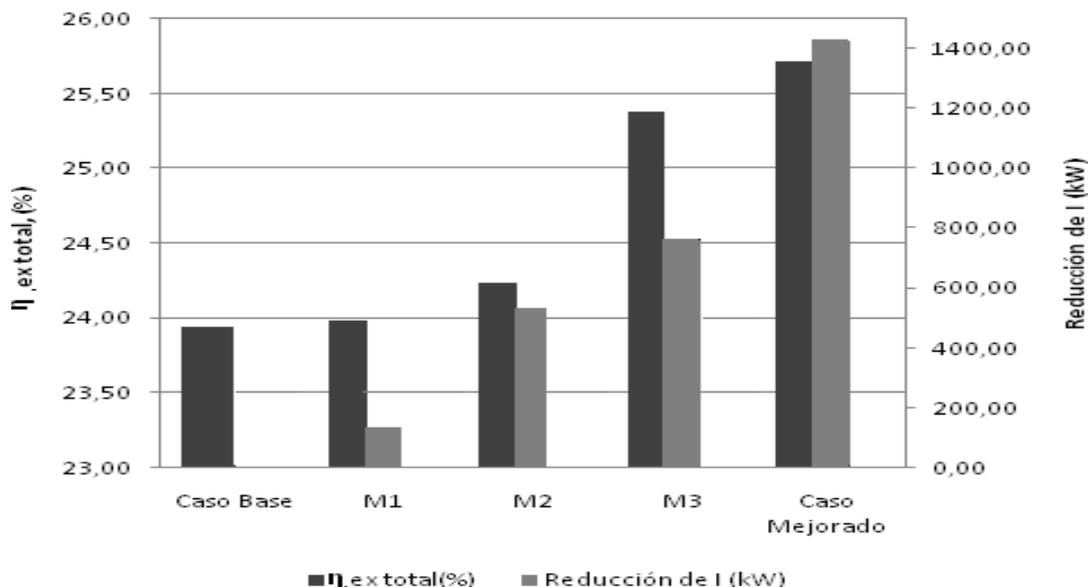
M1: Instalación de variadores de velocidad por frecuencia a las bombas de agua a caldera, ventilador forzado a caldera, estera de caña surtidora y estera de caña elevadora.

M2: Mejorar el sistema de aislamiento en las redes de distribución de vapor, sustituyéndolo en 117,4 m lineales (276,82 m<sup>2</sup>) de vapor directo.

M3: Instalación de economizadores para la disminución de la temperatura de los gases que salen de la chimenea desde 180 °C hasta 150 °C.

Caso mejorado: es la suma de las tres mejoras propuestas anteriormente (M1+M2+M3)

Se determinó el efecto de estas mejoras sobre la eficiencia exergética y las irreversibilidades totales del proceso, según se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Efecto de las mejoras sobre la eficiencia exergetica y las irreversibilidades totales del proceso

Los cambios realizados, ya sean mecánicos o técnicos, muestran resultados positivos sobre la eficiencia exergetica y las irreversibilidades del proceso. La sustitución de variadores de velocidad en bombas, ventiladores y esteras (M1) permite disminuir los consumos de potencias de dichos equipos en un 30%, este comportamiento se traduce en un incremento de 135kW de electricidad entregada a la red nacional, por lo que la eficiencia exergetica del proceso es ligeramente mayor con respecto al caso base.

La disminución de la temperatura de los gases que salen de la chimenea a 30 °C (M3) y la sustitución del sistema de aislamientos (M2) muestran las mayores ventajas desde el punto de vista exergetico, reduciéndose las irreversibilidades en 762kW y 535kW, así como, incrementando la eficiencia exergetica en 1,44% y 0,29% respectivamente. La M2 disminuye el consumo de vapor directo y la M3 mejora la eficiencia en la combustión del bagazo. Ambas mejoras se ven reflejadas en la disminución del consumo de bagazo en la caldera y a su vez en el bagazo sobrante, la cual representa un 5% del caso base.

Analizando el efecto de las tres mejoras en su conjunto sobre las variables exergeticas, se observan significativas mejoras en la eficiencia exergetica (26%), tomando valores superiores en comparación con el caso base (24%), lo cual es inversamente proporcional a las irreversibilidades del proceso, reduciéndose este en 1432 kW.

#### 4. CONCLUSIONES

1. Se determinaron la eficiencia exergetica y se identificaron las etapas de mayores irreversibilidades en el proceso. Además se evaluó un sistema de mejoras basándose en dichos indicadores.
2. El análisis exergetico ha mostrado que las etapas de cogeneración y recepción y molienda muestran las mayores pérdidas por irreversibilidades, alcanzando valores aproximadamente de 35 y 34 % respectivamente de las irreversibilidades totales del caso base.

3. El sistema de mejoras propuestas tienen un efecto positivo sobre la eficiencia exergética y las irreversibilidades del proceso, reduciéndose las irreversibilidades en 1432 kW e incrementándose la eficiencia en 1,77% con respecto al caso base.

## REFERENCIAS

- Alonso-Pippo, W., Luengo, C. A., Koehlinger, J., Garzone, P., and Cornacchia, G., Sugarcane energy use: The Cuban case., *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 2163-2181, 2008.
- Arteaga, P. and Casas L. Y. "Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi equilibrium approach". *Chemical Engineering Journal*. 2013
- Casas Ledón, Y., Introduction of advanced technology (Solid Oxide Fuel Cell) in the sugar cane industry: technical and sustainability analysis., PhD Thesis in Applied Biological Sciences in the University of Ghent, Belgian, 2012.
- Dewulf, J., Langenhove. H. V, Dirckx. J. "Exergy analysis en the assessment of the sustainability of waste gas treatment systems", *The Science of the Total Environment* 273: pp 41-52. 2001
- Dewulf, J., Bösch, M. E., Meester, B. D., Vorst, G. V. D., Langenhove, H. V., Hellweg, S. and Huijbregts, M. A. J., Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting., *Environmental Science & Technology*, Vol. 41, 2007, pp. 8477-8483.
- Ensinas, A.V., Losano M. A., Nebra S. A., Serra L, "Desing of evaporation system and *Journal Energy*, 2007
- Ensinas, A.V., Modesto M., Nebra S. A., Serra L. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugar cane., *Journal Energy*, 2009.
- Espinosa, P. R. y col., *Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera.*, Vol. 1. Editorial ENPES, 1990.
- Gong, M., and Wall, G., On exergy and sustainable development- Part 2. Indicators and methods., *Exergy and International Journal*, Vol. 1, 2000, pp. 217-233.
- Hugot, E., *Manual para ingenieros azucareros.*, Vol. I, Tercera edición, Editorial Revolución, 1986.
- Kotas, T.J., *The exergy method of thermal plant analysis.*, Florida: Krieger Publishing Company, 1995.
- Nebra, S. A. y Fernández M. I., The exergy of sucrose-water solutions: proposal of a calculation method., *Proceedings of ECOS 2005*, Trondheim, Norway.
- Ram JR, Banerjee R. "Energy and cogeneration targeting for sugar factory. *Appl Thermal Eng*, 2003.
- Rosen, M. A., and Dincer, I., Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development., *Exergy International Journal*, Vol. 1, 2001, pp. 3-13.
- Szargut, J., *Exergy Method. Technical and ecological application.*, 2005, UK.
- Pellegrini, L. F., de Oliveira Junior, S., Combined production of sugar, ethanol and electricity; Thermoeconomic and environmental Analysis and optimization., *Energy Journal*, 2010

- Pellegrini, L. F., de Oliveira Junior, S "Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification". Mechanical Engineering Department, Polytechnic School, University of Sao Paulo,, Brazil, 2005
- Wall, G., and Gong, M.. On exergy and sustainable development-Part 1: conditions and concepts., Exergy, an International Journal, Vol. 1: 2001, pp. 128-145.