

GENERACIÓN DE IRREVERSIBILIDADES EN LAS PRODUCCIONES INTEGRADAS DE AZÚCAR, ALCOHOL Y BIOGÁS

IRREVERSIBILITY GENERATION IN SUGAR, ALCOHOL AND BIOGAS INTEGRATED PRODUCTIONS

Meilyn González Cortés^{1}, Yenisleidy Martínez Martínez¹, Yaillet Albornas Carvajal¹
y Raúl A. Pérez Bermúdez²*

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Septiembre 14, 2016; Revisado: Octubre 11, 2016; Aceptado: Octubre 31, 2016

RESUMEN

En este trabajo se determinan las etapas generadoras de pérdidas y de menor eficiencia exergética cuando al proceso de producción de azúcar se integran otros para la producción de productos tales como biogás, levadura torula y electricidad. El estudio se realiza en tres escenarios de procesos integrados para la obtención de los productos señalados. Se considera como escenario base una fábrica de azúcar en la que se produce azúcar y electricidad y a partir del mismo se deduce un segundo escenario en el que se produce alcohol a partir de las mieles del proceso azucarero y biogás a partir de las vinazas del proceso de destilación de alcohol. Por último, se evalúa exergéticamente un tercer escenario en el que se producen azúcar, electricidad, biogás y alcohol, pero este último a partir de jugos y mieles del proceso azucarero. Para el análisis exergético el esquema integrado fue dividido en 8 subsistemas. Del análisis de los resultados se tiene que los subsistemas mayores generadores de irreversibilidades son: cogeneración (64,36-65,98%), extracción de jugo (8,85-9,85%), cristalización y cocción, (8,48-9,02%), fermentación (4,12-4,94%) y destilación (2,74-3,2%). Se proponen mejoras para minimizar las irreversibilidades, entre las que se incluye la integración térmica de los procesos, modificaciones tecnológicas en el proceso de fermentación y la

Copyright © 2017. 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: Meilyn González, Email: mgonzalez@uclv.edu.cu

introducción de equipos más eficientes para la generación de electricidad. La eficiencia exergética se encuentra entre 78,95-81,10%, obteniéndose una mayor eficiencia exergética en el esquema de operación conjunta para la producción de azúcar, alcohol y biogás.

Palabras clave: alcohol, biogás, caña de azúcar exergía, irreversibilidades.

ABSTRACT

In this work, the stages of losses and lower exergetic efficiency are determined when the sugar production process is integrated with others for the production of products such as biogas, torula yeast and electricity. The study is carried out in three scenarios of integrated processes for obtaining the indicated products. A sugar factory in which sugar and electricity are produced is considered as the base scenario and from this; a second scenario is inferred in which alcohol is produced from the molasses of the sugar process and biogas from the vinasse of the alcohol distillation process. Finally, a third scenario is exergetically evaluated in which sugar, electricity, biogas and alcohol are produced, but this last one from juices and molasses of the sugar process. For the exergetic analysis the integrated scheme was divided into 8 subsystems. From the analysis of results, the major subsystems that generate irreversibilities are: cogeneration (64.36-65.98%), juice extraction (8.85-9.85%), crystallization and cooking, (8.48 - 9.02%), fermentation (4.12-4.94%) and distillation (2.74-3.2%). Improvements are proposed to minimize irreversibilities, including the thermal integration of processes, technological modifications in the fermentation process and the introduction of more efficient equipment for the generation of electricity. The exergetic efficiency is between 78.95-81.10%, obtaining greater exergetic efficiency in the scheme of joint operation to produce sugar, alcohol and biogas.

Key words: Alcohol, biogas, sugar cane, exergy, irreversibilities

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la caña de azúcar es una de las principales actividades productivas en la economía cubana, posición que ha alcanzado por las posibilidades de obtención de una diversidad de productos a partir de su fraccionamiento.

Del procesamiento de la caña de azúcar se pueden obtener varios productos principales e intermedios, Rein (2007), entre los que se encuentran el azúcar, mieles, bagazo, alcohol, biogás, levadura torula y otros derivados de alto valor agregado. Se debe sumar a estos productos la electricidad que en los últimos años se ha presentado como un nuevo producto a través del que la industria azucarera puede aumentar sus ingresos.

En la literatura se ha abordado que la producción conjunta de los productos antes mencionados puede elevar los niveles de eficiencia de los procesos tecnológicos a través de los que estos se obtienen, si se logra un buen aprovechamiento de los recursos materiales y energéticos, y si además se tiene en cuenta un intercambio entre los recursos comunes de los mismos, como son agua, vapor y energía eléctrica, (Albarelli et al., 2014; Furlan et al., 2012 y Dias et al., 2009).

Independientemente de las potencialidades que esta integración ofrece a primera vista, no puede obviarse que la selección de los procesos tecnológicos y los productos se traduce en un problema combinatorio del cual se generan múltiples escenarios con diferentes índices de desempeño. En ese sentido para evaluar la eficiencia de los esquemas de producción conjunta, el análisis exergético representa una herramienta efectiva y unificada para evaluar la eficiencia global de los procesos (Albarelli et al., 2014).

El análisis exergético es capaz de localizar las fuentes donde se generan las mayores pérdidas y en base a ello analizar sus causas y proponer mejoras para su minimización. En la literatura se reportan varios estudios que aplican el análisis exergético en procesos que operan de manera individual y otros que operan integrados a través del intercambio de corrientes materiales y energéticas. Entre estos estudios se encuentran los reportados por: (Dias et al., 2009; Ojeda y Kafarov, 2009; Ensinas y Nebra, 2009; Pham y El-Halwagi, 2011; Ojeda et al., 2011; Furlan et al., 2012), entre otros. En Furlan et al., (2012), sus autores realizaron un estudio para la reducción de irreversibilidades en los procesos de producción de azúcar y alcohol, para ello dividen el proceso en ocho subsistemas e identificaron los que mayores irreversibilidades generaban y propusieron modificaciones para atenuarlas; (Dias et al., 2009), aplicaron el análisis exergético a la producción de etanol a partir de bagazo evaluando tres tecnologías de producción y mostraron cómo a través del análisis exergético fue posible valorar alternativas de diseño que condujeron a identificar aquellas con un menor impacto ambiental. Por otro lado, (Ojeda et al., 2011), realizaron el análisis exergético de las producciones integradas de etanol de primera y segunda generación, donde el alcohol de segunda generación se integró al proceso convencional de obtención de alcohol.

En este artículo tiene como objetivo utilizar el análisis exergético en la evaluación de la eficiencia de tres esquemas de producción conjunta de azúcar y otros productos. Los tres esquemas se definieron en función de representar el esquema actual de la fábrica tomada como base en el estudio y otros dos incluyeron tecnologías para la producción de torula y biogás, productos con posibilidades de producirse en ese lugar. Los esquemas concibieron el aprovechamiento de los recursos energéticos y se evaluó su desempeño determinando las ineficiencias termodinámicas en términos de destrucción y pérdidas de exergía en cada escenario.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para incrementar la sostenibilidad en el uso de la energía se deben considerar no sólo las pérdidas de energía sino también las pérdidas de exergía, Kumar, (2016), (Mabrouk et., al. 2016), (Velásquez-Arredondo et al., 2012), Mosqueira, (2012). La aplicación del análisis exergético a un componente, proceso o sector puede guiar sobre cómo mejorar la sostenibilidad reduciendo las pérdidas exergéticas. En este trabajo se llevaron a cabo los siguientes pasos para evaluar exergéticamente el proceso:

1. Realizar los balances de masa y energía en los procesos de producción de azúcar, alcohol a partir de miel, alcohol a partir de jugos del proceso azucarero, biogás y electricidad.
2. Definir los subsistemas para el análisis exergético en el esquema integrado.

3. Determinar las ineficiencias termodinámicas en términos de eficiencia y pérdidas de exergía en cada subsistema.
4. Analizar los resultados.

2.1. Escenarios de funcionamiento integrado.

En el estudio se considera a la caña de azúcar como insumo básico, teniendo en cuenta que a partir de su procesamiento se obtiene azúcar como producto principal, pero también se producen otros subproductos tales como miel, jugo diluido y bagazo. La miel y el jugo son enviados a la destilería y el bagazo se utiliza para la cogeneración de vapor y electricidad.

Por otro lado, de la destilación del vino fermentado se obtienen el alcohol y las vinazas; estas últimas se utilizan para la producción de biogás, el cual se emplea para suplir la demanda de vapor de los procesos. En la figura 1, se muestra el esquema general de funcionamiento integrado de las fábricas para la obtención de azúcar, electricidad, alcohol y biogás.

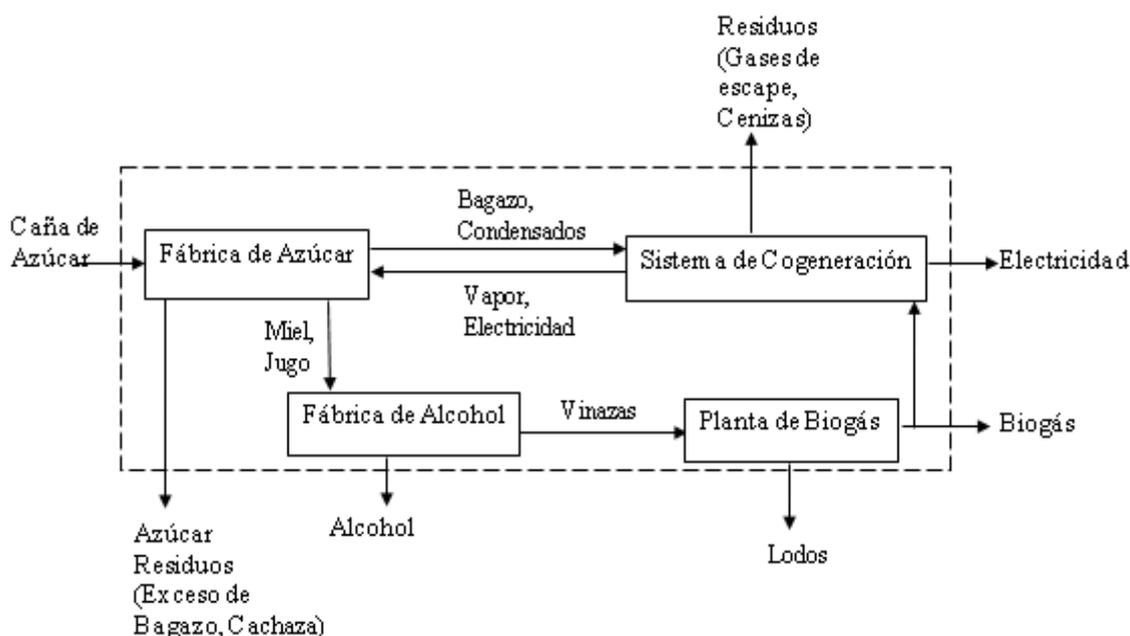


Figura 1. Esquema general de funcionamiento integrado de fábrica de azúcar y derivados

Con el objetivo de determinar las irreversibilidades que se generan en el proceso de producción de azúcar y cuando al mismo se integran otros para la producción de productos tales como biogás, levadura torula y electricidad se definieron tres escenarios. En los escenarios tiene lugar el funcionamiento integrado de los procesos para la obtención de los productos referidos anteriormente.

Por ejemplo, en el escenario 1 tienen lugar las producciones de azúcar y electricidad; en el escenario 2 las producciones de alcohol a partir de miel y biogás y por último, en el escenario 3 tienen lugar las producciones integradas de azúcar, alcohol a partir de miel y jugo, biogás y electricidad. Los escenarios con las producciones integradas que los mismos incluyen están reportados en la tabla 1.

Tabla 1. Escenarios de producciones integradas

<i>Producciones</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>
Azúcar	X		X
Alcohol a partir de miel		X	
Alcohol a partir de miel y jugo			X
Biogás		X	X
Electricidad	X		X

A partir de los balances de masa y energía se obtuvieron los parámetros característicos de las producciones señaladas. Se determinaron los flujos, temperatura y composición de las materias primas, productos y corrientes intermedias principales en cada escenario de producción integrada.

2.2. Análisis exergético

Para el análisis exergético los escenarios se dividieron en ocho subsistemas, descritos a continuación. En este punto es importante hacer notar que la presencia de los subsistemas en cada escenario estará determinada por la producción que tenga lugar en cada uno.

Subsistema I: Extracción de jugo: representa la etapa de molienda, donde el jugo contenido en la caña de azúcar es extraído y separado de la fibra con la adición de agua de imbibición y la utilización de molinos impulsados por electricidad. La fibra separada constituye el bagazo que es utilizado para la cogeneración.

Subsistema II: Tratamiento y calentamiento del jugo: el jugo es tratado con hidróxido de calcio y separado de las impurezas presentes por un proceso de decantación. El jugo es calentado con vapor hasta 100 °C (373,15 K). En esta etapa se destina parte del jugo a la obtención de alcohol, este no es alcalizado.

Subsistema III: Evaporación del jugo: se evapora parte del agua presente en el jugo para llevarlo a una concentración desde 15 °Brix hasta 65 °Brix.

Subsistema IV: Cristalización y cocción: se continúa la evaporación hasta obtener el grano de azúcar cristalizado mediante vapor de escape, seguidamente es separado el cristal de azúcar del licor madre.

Subsistema V: Fermentación: Las fábricas de azúcar y alcohol integradas usan una mezcla de jugos y miel para la preparación del mosto a fermentar, a este se le adiciona la levadura y nutrientes para que ocurra la fermentación y la miel es diluida para alcanzar los grados Brix requeridos para la fermentación alcohólica. Se obtiene un líquido rico en alcohol conocido como vino con una concentración de 6 °GL y desprendimiento de CO₂ productos de la reacción de fermentación.

Subsistema VI: Destilación de alcohol: obtención de alcohol extrafino con una concentración de 96,3°GL y de las vinazas que en este estudio se destinan a la producción de biogás.

Subsistema VII: Producción de biogás, se emplea un reactor UASB, por sus siglas en inglés, (*Upflow anaerobic sludge blanket*), el cual produce biogás a partir de la materia orgánica presente en las vinazas.

Subsistema VIII: Cogeneración: Subsistema donde se satisfacen las demandas térmicas y eléctricas de los procesos que se incluyen en el estudio. El vapor producido es

conducido a una turbina de vapor, donde se expande y da lugar a la producción de energía mecánica la cual se emplea para mover un generador eléctrico. El vapor agotado a la salida de la turbina, es usado como fuente de energía térmica en el proceso industrial. En la fábrica en estudio se emplean turbinas de contrapresión.

En cada subsistema se determinaron la eficiencia y las pérdidas exergéticas a través de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$\eta = \frac{\sum e_{sal}}{e_{ent}} \quad (1)$$

$$I = e_{ent} - e_{sal} \quad (2)$$

Siendo: e_{ent} y e_{sal} , la exergía específica (kJ/kg), de las corrientes de entrada y salida respectivamente.

La exergía de cada corriente en el sistema se calculó como la suma de la exergía física y química.

$$e = e^{PH} + e^{CH} \quad (3)$$

Siendo e^{PH} y e^{CH} , la exergía de flujo (kJ/kg), física y química respectivamente.

En la expresión anterior, si se compara con la expresión general reportada en De Oliveira (2013), se puede observar que se despreciaron los componentes cinéticos y potenciales dado que ambas formas de energía se convierten completamente en trabajo por tanto afectarán en el mismo orden la exergía de las corrientes de entrada y de salida.

La exergía física se calculó por la siguiente expresión:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4)$$

Siendo h y h_0 la entalpía (kJ/kg), en las condiciones de trabajo y las de referencia respectivamente; T_0 (°C), la temperatura de referencia; s y s_0 la entropía (kJ/kg-K), en las condiciones de trabajo y las de referencia respectivamente.

Las condiciones estándar para el cálculo de la exergía en el estado de referencia se tomaron: 25°C (298,15 K) y 1 bar (100 kPa).

Para las corrientes que constituyen soluciones, la exergía química se calculó mediante la siguiente expresión:

$$e^{CH} = \left(\frac{1}{M_{sol}}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot \varepsilon_i^{-0} + RT_0 \sum_{i=1}^n y_i \cdot \ln a_i \right] \quad (5)$$

Donde el primer término representa la exergía estándar química de los componentes puros y el segundo la destrucción de exergía del proceso de disolución. Siendo M_{sol} la masa molar (kg/kmol); y_i fracción molar; ε_i^{-0} exergía química estándar del componente puro (kJ/kg); R constante ideal de los gases (J/mol-K) y a_i coeficiente de actividad.

Teniendo en cuenta los procesos de producción que se abordan en este trabajo y lo que se ha reportado en la literatura para el análisis exergético de procesos químicos, es importante hacer notar que se siguieron las consideraciones:

- Las exergías de las soluciones de sacarosa y glucosa se determinaron de acuerdo a lo reportado en las referencias, (Ojeda et al., 2011), Mosqueira, (2012), (Palacios-Bereche et al., 2013).

- Las exergías de las soluciones etanol-agua, tales como etanol hidratado y etanol extrafino se calcularon de acuerdo a los procedimientos descritos en (Furlan et al., 2012), y (Szargut et al., 1988).
- Las exergías químicas de corrientes tales como el vino a fermentar, vinazas y flemazas de la destilación; se consideraron como soluciones ideales y en la ecuación 5 en lugar del coeficiente de actividad se empleó la concentración molar, el resto de los términos se calcularon de la misma forma. Esta consideración pudo hacerse porque se trataba de soluciones muy diluidas y los datos de coeficiente de actividad no se encontraron disponibles en la literatura, además, la exergía de la fracción diluida es muy pequeña en comparación con la exergía química estándar de la fracción del componente puro.
- La exergía química estándar de los componentes puros fueron obtenidas de (Velásquez-Arredondo et al., 2012).
- La exergía del bagazo fue determinada de acuerdo al procedimiento reportado en (Sosa-Arno y Nebra, 2005), (Ensinas et al., 2009) y (Palacios-Bereche et al., 2013).
- La exergía química específica para el biogás se calculó por la ecuación 5, teniendo en cuenta la composición del biogás tomando como referencia lo reportado por (Szargut et al., 1988) y conociendo que la masa molecular del biogás es de 28,51 kg/kmol. En la tabla 2, se reportan los datos de composición molar, masa molecular y exergía química de los componentes del biogás, (Gandolla et al., 1997), (Doseva et al., 2015)

Tabla 2. Datos y exergía química de los componentes del biogás

<i>Componente</i>	<i>Fracción molar del biogás (mol/mol)</i>	<i>Masa molecular (kg/kmol)</i>	<i>Exergía química estándar (kJ/mol)</i>
CH ₄	0,52	16	831,65
CO ₂	0,42	44	19,87
N ₂	0,048	28	0,72
O ₂	0,01	32	3,97
CO	0,001	28	275,1
H ₂	0,001	2	236,1

La exergía específica del biogás calculada fue de 15400 kJ/kg, que es equivalente al valor reportado por Gutiérrez (2014) que fue de 16000 kJ / kg.

Las exergías calculadas se compararon con las reportadas en varias bibliografías, (Nebra y Fernández-Parra, 2005), (Ensinas et al., 2007), (Ojeda et al., 2011) y (Palacios-Bereche et al., 2013). Los trabajos tomados como referencia en los procesos evaluados se encontraban en condiciones similares a las tratadas en este.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se explicó anteriormente para el análisis exergético se dividió el esquema integrado en ocho subsistemas. Se determinaron las eficiencias y las pérdidas generadas

en cada subsistema y en los tres escenarios definidos previamente. En la tabla 3, se reportan los valores de exergía de las corrientes principales involucradas.

Tabla 3. Corrientes involucradas en el análisis exergético

<i>Corrientes</i>	<i>Flujo [kg/s]</i>	<i>T [°C], (K)</i>	<i>P [atm], (kPa)</i>	<i>ex [kJ/kg]</i>	<i>Ex [kJ/s]</i>
Caña de azúcar	53,2	25, (298,15)	1, (98,07)	5300	281938,00
Agua Imbibición	11,08	72, (345,15)	1, (98,07)	82	908,18
Agua de lavado	283	70, (343,15)	1, (98,07)	54	15282,00
Electricidad subsistema I	-	-	-	-	1456,00
Bagazo Salida	16,12	30, (303,15)	1, (98,07)	9500	153113,00
Jugo Mezclado	47,87	35, (308,15)	1, (98,07)	2362	113083,70
Jugo a fábrica de Azúcar	46,11	35, (308,15)	1, (98,07)	2362	22108,32
Lechada de cal	0,63	25, (298,15)	1, (98,07)	1965	1239,94
Ácido fosfórico	2,1	25, (298,15)	1, (98,07)	1061	2333,22
Vapor calentamiento jugo	5,64	115, (388,15)	1,69, (165,73)	668	3772,90
Electricidad subsistema II	-	-	-	-	1250,00
Condensado calentamiento de jugo	5,65	115, (388,15)	1,69, (165,73)	111	626,93
Jugo fabricación de alcohol	9,36	35, (308,15)	1, (98,07)	2362	22108,32
Vapor de escape Múltiple efecto	5,54	115, (388,15)	1,69, (165,73)	668	3700,72
Electricidad subsistema III	-	-	-	-	750,00
Meladura	9,39	57, (330,15)	0,16, (15,69)	10090	94745,10
Condensado caldera a	3,35	101, (374,15)	1,69, (165,73)	53,82	180,33
Condensado MEE	3,95	101, (374,15)	1,69, (165,73)	53,08	209,66
Vapor cristalización y cocción	16,61	98, (371,15)	0,9, (88,26)	668	47205,60
Electricidad subsistema IV	-	-	-	-	375,00

Azúcar	3,37	25, (298,15)	1, (98,07)	17664	59527,70
Miel	2,47	57, (330,15)	1, (98,07)	12824	31675,30
Condensado de subsistema IV a caldera	16,61	98, (371,15)	0,9, (88,26)	111	1843,71
Agua dilución miel	4,64	25, (298,15)	1, (98,07)	50	232,00
Microorganismo	2,29E-05	25, (298,15)	1, (98,07)	82,7	0,0019
Nutrientes	0,008	25, (298,15)	1, (98,07)	1294,07	10,78
Electricidad subsistema V	-	-	-	-	375,00
Vino Fermentado	16,27	30, (303,15)	1, (98,07)	2375	38641,30
CO ₂	0,578	30, (303,15)	1, (98,07)	0,84	0,486
Vapor subsistema VI	4,59	115, (388,15)	1,69, (165,73)	668	3071,93
Electricidad subsistema VI	-	-	-	-	375,00
Alcohol 96°GL	0,806	25, (298,15)	1, (98,07)	29550	23825,40
Condensado a caldera	4,59	115, (388,15)	1,69, (165,73)	111	510,45
Vinazas	16,87	82, (355,15)	1, (98,07)	443	7475,88
Agua sistema de enfriamiento	20,6	25, (298,15)	1, (98,07)	50	1029,00
Etanol hidratado	0,44	30, (303,15)	1, (98,07)	4,49	1,96
Agua	1,63	30, (303,15)	1, (98,07)	42,92	70,31
Biogás	0,112	55	1, (98,07)	15400,00	1011,06
Efluente del reactor de biogás	16,73	25	1, (98,07)	50	836,50

En la tabla 4 se reportan las eficiencias y los porcentajes de pérdidas que se tienen en cada subsistema, de modo que se tiene la contribución de cada subsistema a las pérdidas totales del esquema integrado.

Como se puede apreciar, el subsistema de cogeneración es el responsable de más del 50% de las pérdidas exergéticas en todos los escenarios evaluados (64,36-65,98%), es importante resaltar que, de estas pérdidas, el mayor porcentaje tiene lugar en las calderas, lo que se debe a ineficiencias en el proceso de combustión que es la principal fuente de destrucción de exergía.

Tabla 4. Eficiencia y porcentaje de pérdidas exergéticas en los escenarios evaluados

<i>Etapas</i>	<i>Eficiencia Exergética, %</i>			<i>Porcentaje de pérdidas, % *</i>		
	<i>Escenarios</i>			<i>Escenarios</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
I (Extracción)	92,71	92,71	92,71	8,85	9,85	9,38
II (Tratamiento jugo)	95,39	95,39	96,16	3,17	3,29	3,14
III (Evaporación)	92,22	92,22	94,65	4,84	4,64	4,4
IV (Cocción y cristalización)	86,49	86,49	88,93	9,02	8,62	8,48
V (Fermentación)	-	78,64	82,00	4,94	4,12	4,86
VI (Destilación)	-	78,75	80,06	3,2	2,84	2,74
VIII (Biogás)	-	66,14	67,04	-	1,64	2,64
IX (Cogeneración)	31,35	29,00	28,82	65,98	65	64,36
Total	80,26	78,95	81,10	100	100	100

* Respecto a las pérdidas totales

Estos resultados pueden conducir al criterio de que si se realizan modificaciones en el subsistema de cogeneración se tendrá un impacto mayor en la eficiencia global del sistema sobre otras modificaciones que puedan realizarse en otros subsistemas, pero no puede obviarse que cuando se trabaja en esquemas de funcionamiento integrado existe una gran interacción entre los subsistemas, por lo que cambios en un subsistema tendrá impactos en el desempeño global del proceso, lo que significa que no pueden subestimarse los impactos que pueden tener las mejoras aplicadas a otros subsistemas con menores porcentajes de pérdidas.

Los subsistemas con mayores pérdidas después del de cogeneración son el de fermentación y el de destilación debido a ineficiencias en el proceso de fermentación y al calor disipado debido a la naturaleza de las reacciones exotérmicas que tienen lugar durante la fermentación.

Otra de las etapas que genera irreversibilidades es el subsistema de extracción de jugo, se tiene para todos los escenarios evaluados un 92,71% de eficiencia y de un 8,95 – 9,38% de pérdidas exergéticas. Las mismas se deben a las pérdidas de azúcar que ocurren en durante la extracción de jugo, así como a los altos consumos de energía eléctrica de los motores que mueven los molinos y las esteras.

Se debe hacer notar que los altos consumos de electricidad son índices tradicionales y característicos para molinos electrificados de acuerdo a lo que plantean De Oliveira, (2013) y (Cabrera et al., 2014).

En el subsistema IV (cristalización y cocción), el porcentaje de pérdidas (entre 8,48 - 9,02 %), se debe al consumo de vapor de escape utilizado como fuente de calor para la concentración de la meladura en los tachos, ya que en el proceso de producción de azúcar evaluado el esquema no está integrado energéticamente. También las pérdidas de azúcar que tienen lugar en la separación de la miel final influyen en la generación de las irreversibilidades en dicho subsistema.

En este análisis es importante hacer notar que en los escenarios evaluados no existe integración térmica ni en los subsistemas individuales que tienen posibilidades para ello como son: evaporación, calentamiento del jugo y cocción, ni entre estos, por lo que el consumo de vapor de escape es mayor y no hay aprovechamiento de corrientes que son

vertidas al medio con calidad térmica, lo que conduce a los valores de eficiencias de los escenarios 1 y 2.

Debe señalarse también que la eficiencia exergética total se encuentra entre 78,95-81,10% y que se tienen mejores resultados en el manejo de los recursos cuando se incluye la valorización de residuales como es el caso de las vinazas para biogás (escenario 3).

3.1. Soluciones planteadas para mejorar los parámetros exergéticos.

Atendiendo a las cuestiones referidas anteriormente se realizó una búsqueda bibliográfica en artículos que abordaron esta temática con el objetivo de analizar las mejoras planteadas para el desempeño exergético de los subsistemas evaluados. Las soluciones planteadas se han resumido de la siguiente forma:

Subsistema I (Extracción): Para disminuir las pérdidas de azúcar hay que lograr una mayor relación de recobrado, en la fábrica en estudio se tenía un 90%, valor bajo atendiendo que en los molinos la recuperación de sacarosa puede ser de hasta un 97%. En (Cabrera et al., 2014), se reporta que si se emplean difusores se puede alcanzar un 99% de extracción de sacarosa.

Subsistema II (Tratamiento del jugo): Se propone el manejo eficiente del vapor vegetal del múltiple efecto, así como el uso de intercambiadores de calor regenerativos para la recuperación de la exergía térmica de los condensados.

Subsistema III (Evaporación): Garantizar una distribución más uniforme de las pérdidas de exergía entre los efectos, considerando la extracción del vapor de los efectos y la distribución de presión entre los procesos que minimice la diferencia de temperatura en el efecto. Otra de las mejoras que se reportan es la integración térmica para la reducción del consumo de vapor en el esquema de evaporación.

Subsistema IV (Cocción y cristalización): Se propone la integración térmica para la reducción del consumo de vapor, disminución de la diferencia de temperatura del proceso a través del uso de vapor vegetal, (segundo o tercer efecto), reducción de la demanda térmica de este subsistema aumentado el Brix de la meladura (salida del múltiple efecto) y la reducción de las pérdidas de azúcar que tienen lugar en la separación de la miel final.

Subsistema V (Fermentación): Incremento de la concentración de etanol en el vino fermentado, lo que reducirá los requerimientos térmicos de esta etapa, lo que puede lograrse con un mejor control en los fermentadores, De Oliveira, (2013), fermentación extractiva, (Palacios-Bereche et al., 2013).

Subsistema VI (Destilación): Integración térmica y aprovechamiento de corrientes con calidad térmica para menor consumo de vapor; esquemas de destilación doble efecto, De Oliveira (2013), (González y col., 2016), empleo de sistemas de pervaporación, (Modesto et al., 2005).

Subsistema VIII (Cogeneración): Empleo de mayores parámetros de presión y temperatura en la generación de vapor, mejores sistemas de combustión, reducción del aire requerido, disminución de la temperatura de los gases de escape, reemplazo de válvula reductora por un eyector, reducción de la demanda de vapor en el múltiple efecto, elevar la eficiencia en la generación de electricidad. Incremento de la eficiencia a través del uso de los gases de escape para el secado del bagazo, así como el uso del

bagazo sobrante para la generación de más electricidad o destinar a otras aplicaciones. También se ha propuesto la implementación de sistemas de cogeneración más avanzados tales como: Ciclos de vapor supercrítico (SuSC) y/o ciclos combinados de gasificación de biomasa (BIGCC). Estas configuraciones requerirán modificaciones en la red de intercambiadores de calor para reducir el consumo de vapor de contrapresión.

4. CONCLUSIONES

1. El análisis exergético realizado para los escenarios que incluyen el funcionamiento integrado de las producciones de azúcar, alcohol, electricidad, levadura torula y biogás mostró que el mayor porcentaje de pérdidas exergéticas se tienen en el subsistema de cogeneración, con valores que significan entre 64,36 y 65,98 % de las pérdidas totales que se tienen en los escenarios.
2. En relación a la eficiencia exergética se obtuvo el mejor resultado (81,10 %), en el escenario que incluye la mayor diversificación de productos, lo que muestra la sustentabilidad de los esquemas integrados.
3. Atendiendo a que cuando se trabaja en esquemas de funcionamiento integrado existe gran interacción entre los subsistemas, las modificaciones tecnológicas que se propongan en cada uno conducirá a mejoras en la eficiencia exergética y a la reducción de pérdidas de exergía en el esquema global. En este sentido para trabajos futuros se recomienda cuantificar los resultados en el análisis exergético que se tienen producto de la integración energética de los procesos individuales y luego evaluar otras modificaciones más costosas relacionadas con cambios a equipos de mayor eficiencia energética.

REFERENCIAS

- Albarelli, Q., Ensinas, A.V., Silva, M., Product diversification to enhance economic viability of second generation ethanol production in Brazil: The case of the sugar and ethanol joint production., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 92, 2014, pp.1470–1481.
- Cabrera, H., Casas, Y., De la Cruz, L., Arteaga, L.E., Análisis Exergético del proceso de producción de Azúcar Crudo., *Centro Azúcar*, Vol. 41, No. 3, 2014, pp. 1-13.
- De Oliveira, Jr, S., *Exergy: Production, Cost and Renewability (Green Energy and Technology)*., Springer-Verlag London, 2013.
- Dias, M.O.S., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Maciel Filho, R., Rossell, C.E.V., Maciel, M.R.W., Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process., *Chemical Engineer Research and Design*, Vol. 87, 2009, pp.1206–1216.
- Doseva, N., Chakyrova, D., Energy and exergy analysis of cogeneration system with biogas engines., *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 1, No. 3, 2015, pp. 391-401.
- Ensinas, A., Modesto, M., Nebra, S., Serra, L., Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane., *Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 680– 688.
- Ensinas, A., Nebra, S., Lozano, M., Serra L., Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane., *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, 2007, pp.2978-2987.

- Ensinas, V., and Nebra, S., Exergy analysis as a tool for sugar and ethanol process., Handbook of exergy, hydrogen energy and hydropower research., New York: Ed. Nova Science Publishers Inc., 2009. pp. 125 - 160.
- Furlan, F.F., Costa, C.B.B., Cruz, A.J.G., Secchi, A.R., Soares, R.P., Giordano, R.C., Integrated tool for simulation and optimization of a first and second generation ethanol-from-sugarcane production plant., Computer Aided Chemical Engineering, Vol. 30, 2012, pp. 82–85.
- Gandolla, M., Acaia, C., Fischer, C., Formazione, captazione e stuttamento di biogas in doscariche., Seminario di Aggiornamento, Collana Ambiente. Milão, Italia, 1997.
- González, M., Fariñas, A., Martínez, Y., Castellano, L., Albornas, Y., Análisis energético e integración de la destilación de alcohol: Método convencional y doble efecto., Centro Azúcar, 2016, Vol. 43, No. 3, pp. 49-65.
- Gutiérrez, D.A., Análise exérgica e ambiental da produção e uso de biogás para geração distribuída., Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Setembro, 2014.
- Kumar, R., A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants., Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.018>. *In press.*
- Mabrouk, A., Erdocia, X., Alriols, M., Jeday, M., Labidi, J., Exergy Analysis: An optimization tool for the performance evaluation of an organosolv process., Applied Thermal Engineering, Vol. 105, 2016, pp. 1062–1066.
- Modesto, M., Nebra, S., Zemp, J., A proposal to calculate the exergy of non ideal mixtures ethanol and water using properties of excess., Proceedings of 14th European biomass conference and exhibition, Biomass for energy, industry and climate protection, Paris, France, October 2005, pp. 1924-1927.
- Mosqueira, K., Water use and exergetic analysis in the integrated production of first and second generation ethanol from sugarcane., Master thesis, São Paulo, Brazil: Mechanical Engineering School, University of Campinas, 2012.
- Nebra, S., Fernández-Parra, M., The exergy of sucrose and water solutions: proposal of a calculation method., Proceedings of ECOS 2005 18th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, Trondheim, Norway, June 2005, Vol.1. pp. 385-392.
- Ojeda, K., and Kafarov V., Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol., Chemical Engineering Journal, Vol.154, 2009, pp.390 - 395.
- Ojeda, K., Sánchez, E., Kafarov, V., Sustainable ethanol production from lignocellulosic biomass and application of exergy analysis., Energy, Vol. 36, 2011, pp. 2119-2128.
- Palacios-Bereche, R., Mosqueira-Salazar, K., Modesto, M., Ensinas, A., Nebra, S., Serra, L., Lozano, M.A., Exergetic analysis of the integrated first- and second-generation ethanol production from sugarcane., Energy, Vol. 62, 2013, pp.46-61.
- Pham, V., and El-Halwagi, M., Process synthesis and optimization of biorefinery configurations., AIChE Journal, Vol. 58, No. 4, 2011, pp. 1234-1243.
- Rein, P., Cane sugar engineering., Berlin: Verlag Dr.Albert Bartens KG, 2007.

- Sosa-Arno, J., Nebra, S., Exergy of sugar cane bagasse., In: Proceedings of 14th European biomass conference and exhibition, Biomass for energy, industry and climate protection, Paris, France, 17-21 October, 2005.
- Szargut, J., Morris, D., Steward, F., Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes., New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- Velásquez-Arredondo, H., De Oliveira, Jr, S., Benjumea, P., Exergy efficiency analysis of chemical and biochemical stages involved in liquid biofuels production processes., Energy, Vol. 41, 2012. pp. 138-145.