

Análisis exergético de escenarios integrados de producción de etanol y otros productos a partir de la caña de azúcar

M. González Cortés¹, S. Herrera Álvarez¹, Y. Martínez Martínez¹, Y. Albornas Carvajal¹, M. Morales Zamora¹ y V.M. González Morales²

¹Departamento 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 ²Empresa Azucarera Antonio Sánchez. Cienfuegos, Cuba.

Exergy analysis of integrated scenarios to ethanol and other products production from sugar cane
Anàlisi exergètic d'escenaris integrats de producció d'etanol i altres productes a partir de la canya de sucre

RECEIVED: 15 JULY 2016; REVISED: 30 SEPTEMBER 2016; ACCEPTED: 17 OCTOBER 2016

SUMMARY

The exergy analysis of six scenarios of integrated schemes for the production of alcohol and other products derived from sugar cane, in order to identify and locate the main sources of irreversibility in these schemes is done. In integrated schemes it is considered sugar cane as the main raw material for the generation of products and co-products. The six scenarios of integration evaluated include the production of sugar, alcohol and first and second generation coproducts such as furfural and lignin, torula yeast obtaining and recovery of CO₂. The mass and energy balances for each process were conducted, determining the stream flows involved in the exergetic analysis. Exergy analysis for the integrated scheme was divided into 10 subsystems. Subsystems juice extraction, crystallization and cooking, fermentation and distillation were higher generators exergy losses. Total exergy efficiency of integrated schemes was between 71-80% for scenarios 1 to 5 and 59% for the scenarios that represent not harvest season.

Keywords: Exergy analysis; sugarcane; sugar; ethanol; torula yeast.

RESUMEN

Se realiza el análisis exergético de seis escenarios para la producción conjunta de alcohol y otros productos derivados de la caña de azúcar, con el objetivo de identificar y localizar las principales fuentes generadoras de irreversibilidades en estos esquemas. En los esquemas integrados se considera la caña de azúcar como materia prima principal para la generación de productos y coproductos. Los seis escenarios de integración evaluados incluyen la producción de azúcar, alcohol de primera y segunda generación y coproductos tales como: furfural

y lignina, la obtención de levadura torula y la recuperación del CO₂. Se realizaron los balances de masa y energía para cada proceso, determinando los flujos de las corrientes que intervienen en el análisis exergético. Para el análisis exergético el esquema integrado fue dividido en diez subsistemas. Los subsistemas extracción de jugo, cristalización y cocción, fermentación y destilación resultaron los mayores generadores de pérdidas exergéticas. Para los primeros cinco escenarios la eficiencia exergética total se encuentra entre 71-80% y para el escenario de tiempo de no zafra en un 59%.

Palabras clave: Análisis exergético; caña de azúcar; azúcar; alcohol; torula.

RESUM

Se realitza l'anàlisi exergètic de sis escenaris per la producció conjunta d'alcohol i altres productes derivats de la canya de sucre, amb l'objectiu d'identificar i localitzar les principals fonts generadores d'irreversibilitat en aquests esquemes. En els esquemes integrats es considera la canya de sucre com matèria primera principal per la generació de productes i coproductes. Els sis escenaris de integració avaluats influeixen la producció de sucre, alcohol de primera i segona generació i coproductes com ara: furfural i lignina, l'obtenció de llevat de torula i la recuperació del CO₂. Es van realitzar els balanços de massa i energia per cada procés, determinant els fluxos de les corrents que intervenen a l'anàlisi exergètic. Per l'anàlisi exergètic l'esquema integrat va ser dividit en deu subsistemes. Els subsistemes d'extracció de suc, cristallització i cocció, fermentació i destil·lació

*Corresponding autor: mgonzalez@uclv.edu.cu

van resultar ser els majors generadors de pèrdues exergètiques. Pels primers cinc escenaris l'eficiència exergètica total es troba entre 71-80% i un 59% pels escenaris que no representen a la temporada de collita.

Paraules clau: Anàlisi exergètic; canya de sucre; sucre; alcohol; torula.

INTRODUCCIÓ

El proceso de producción de alcohol tiene potencialidades para trabajar de forma integrada a otros procesos ya que para su producción se pueden emplear diferentes sustratos azucarados, tales como mieles y jugos del proceso azucarero e hidrolizado de bagazo. El uso de diferentes sustratos en la producción de alcohol genera variantes tecnológicas para su conducción, como son estas dos que se refieren a continuación: método convencional o alcohol de primera generación en el que se emplean como sustratos miel y jugos del proceso de fabricación de azúcar; alcohol de segunda generación que es el que se obtiene del hidrolizado de bagazo o la operación conjunta de estas dos tecnologías como lo abordan¹. Si la integración de estas tecnologías se realiza considerando un aprovechamiento e intercambio de los recursos materiales y energéticos comunes en estos procesos como son: el agua, la energía, la electricidad y las corrientes residuales del proceso; puede resultar un complejo productivo con mayor eficiencia técnica, económica y ambiental donde también pueden estar integrados otros procesos como son la producción de levadura torula, CO₂, lignina, furfural, entre otros.

Independientemente de las potencialidades que esta integración ofrece a primera vista, no puede obviarse que la selección de los sustratos azucarados, los productos y las tecnologías para producirlos, se traduce en un problema combinatorio del cual se generan múltiples escenarios con diferentes índices de desempeño que pueden ser evaluados en términos de su sustentabilidad y el uso de los recursos energéticos². En este contexto, el análisis exergético constituye una herramienta efectiva y unificada para evaluar la eficiencia global de los procesos y en este trabajo se aplica a escenarios integrados de producción de etanol y otros productos a partir de la caña de azúcar.

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^{5, 6, 9, 11, 12, 13 y 19}, entre otros. En⁵, los autores realizan un estudio para la reducción de irreversibilidades en los procesos de producción de azúcar y alcohol, para ello dividen el proceso en 8 subsistemas e identifican los que mayores irreversibilidades generan y proponen modificaciones para atenuarlas. Por otro lado^{11 y 12}, aplican el análisis exergético a la producción de etanol a partir de bagazo evaluando tres tecnologías de producción y muestran

cómo a través del análisis exergético se valoran alternativas de diseño que conducen a identificar aquellas con un menor impacto ambiental y por último¹³, realiza el análisis exergético de las producciones integradas de etanol de primera y segunda generación, donde el alcohol de segunda generación se integra al proceso convencional de obtención de alcohol. En ese trabajo se evaluaron siete casos que operan en diferentes condiciones, entre estos, producción convencional de alcohol sin la planta de hidrólisis, una planta convencional combinada con hidrólisis y concentración del hidrolizado por evaporación y por sistema de membranas. En este contexto se inserta el estudio que se presenta en este artículo cuyo objetivo principal es evaluar las ineficiencias termodinámicas en términos de destrucción y pérdidas de exergía de escenarios de integración de tecnologías de producción de etanol y otros productos a partir de la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis exergético está relacionado con la sostenibilidad debido a que, al incrementar la sostenibilidad en el uso de la energía, se deben considerar no sólo las pérdidas de energía sino también las pérdidas de exergía. Una de las principales ventajas del análisis exergético sobre el análisis energético es que la exergía contenida en los flujos de un proceso es mejor evaluada que la energía, ya que la exergía indica la fracción de energía útil y que es realmente usada^{10 y 18}. La exergía tiene dos componentes, la llamada exergía física y la exergía química.

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 para evaluar exergéticamente el proceso se realizan los siguientes pasos:

1. Balances de masa y energía en los procesos de producción de azúcar, alcohol de primera y segunda generación, levadura torula y recuperación de los coproductos CO₂, lignina y furfural.
2. Síntesis de escenarios de funcionamiento integrado.
3. Definición de subsistemas para el análisis exergético en el esquema integrado.
4. Determinación de las ineficiencias termodinámicas en términos de eficiencia y pérdidas de exergía en cada subsistema.
5. Análisis de resultados.

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. Es importante hacer notar que el bagazo también se puede utilizar para la producción de alcohol, para ello el mismo es sometido a un pretratamiento en dos etapas donde se generan residuales líquidos de los cuales se recuperan como coproductos la lignina y el furfural, productos de alto valor agregado que tienen múltiples usos y contribuyen a la rentabilidad de ese proceso, tal como se aborda en¹. En el presente trabajo, el hidrolizado de bagazo se emplea mezclado

con los sustratos miel y jugo para la obtención de alcohol, es por ello que en la definición de los escenarios no aparece la producción de alcohol sólo con el mismo. Por otro lado, de la destilación del vino fermentado se obtienen el alcohol y las vinazas; estas últimas se utilizan en la obtención de la levadura torula.

Atendiendo a lo que se ha explicado se definen seis escenarios de procesos integrados. Cada escenario incluye determinados procesos y productos: el escenario 1 incluye los procesos tecnológicos para la producción de azúcar, alcohol a partir de miel y levadura torula; el escenario 5 constituye el de mayor complejidad tecnológica ya que considera los procesos para la producción de azúcar, alcohol a partir de los tres sustratos: miel, jugo e hidrolizado de bagazo, levadura torula, coproductos furfural y lignina y la recuperación de CO₂. En los escenarios 2 y 3 básicamente se evalúan variantes tecnológicas para la obtención de alcohol en dependencia de los sustratos que se utilizan y se mantiene la producción de azúcar y levadura Torula; el escenario 4 es similar al 3 sólo con la diferencia de que se considera la recuperación de CO₂.

Por último, el escenario 6 representa un esquema que opera en período de no zafra, no se produce azúcar, pero se obtiene alcohol de miel e hidrolizado de bagazo, levadura torula, los coproductos mencionados y también se recupera CO₂. En la tabla 1, se especifican los procesos que se incluyen en cada escenario.

Tabla 1. Escenarios de integración evaluados

Procesos	Escenarios					
	1	2	3	4	5	6
Azúcar	X	X	X	X	X	
Alcohol a partir de miel	X					
Alcohol a partir miel y jugo (1G)		X				
Alcohol miel y bagazo (2G)						X
Alcohol (3 sustratos azucarados)			X	X	X	
Torula	X	X	X	X	X	X
Furfural					X	X
Lignina					X	X
CO ₂				X	X	X

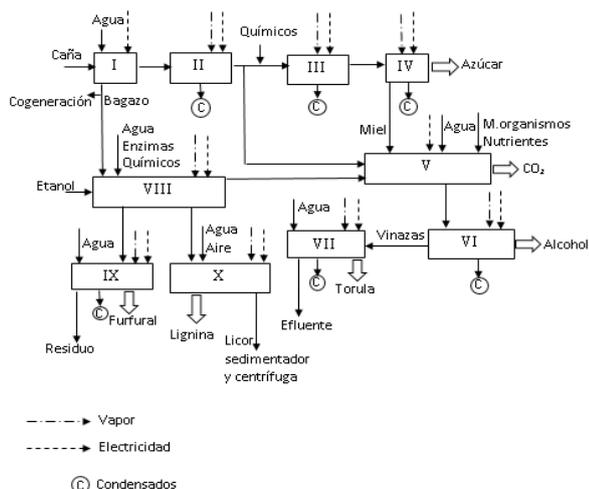


Figura 1. Esquema general de funcionamiento integrado de fábricas de azúcar y derivados.

A partir de los balances de masa y energía se obtienen los parámetros que caracterizan la obtención

de los productos señalados. Se determinan los flujos y características de temperatura y composición de las materias primas, productos y corrientes intermedias del esquema integrado.

En la figura 1, se muestra el esquema general de funcionamiento integrado, en el mismo se representan los procesos, corrientes de entrada, salida e intermedias principales. A partir de este esquema se definen 6 escenarios de funcionamiento integrado.

Para el análisis exergético el esquema integrado se divide en 10 subsistemas, estos se describen a continuación.

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 puede ser utilizado para la obtención de etanol y/o para la cogeneración. En este trabajo se fija una cantidad de bagazo para su empleo en la obtención de alcohol, el resto se destina a la cogeneración.

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

Subsistema III: Evaporación del jugo: en esta etapa se evapora parte del agua presente en el jugo para llevarlo a una concentración desde 15 oBrix hasta 65 oBrix, con la utilización de vapor como medio de calentamiento.

Subsistema IV: Cristalización y cocción: en esta etapa se continúa la evaporación ahora más lenta hasta obtener el grano de azúcar cristalizado mediante vapor de escape, seguidamente es separado el cristal de azúcar del licor madre en el que se encuentra.

Subsistema V: Fermentación: Las fábricas de azúcar y alcohol integradas usan una mezcla de jugos, hidrolizado de bagazo y miel para la preparación del mosto a fermentar, a estos se les 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. En esta etapa 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: el flujo de vino proveniente de la fermentación es destilado hasta la obtención de alcohol extrafino con una concentración de 96,3 °GL y se obtiene además como residuo altamente contaminante las vinazas que en este estudio se destinan a la producción de levadura torula.

Subsistema VII: Producción de levadura torula: en esta etapa se utilizan las vinazas residuo de la destilación de alcohol para la producción de levadura torula. Se considera como volumen de control la planta completa para lo cual se identifican las corrientes de entrada y salida principales.

Subsistema VIII: Pretratamiento e hidrólisis enzimática del bagazo: En esta etapa el bagazo pasa por un tratamiento con ácido sulfúrico, hidróxido de sodio y etanol, inyectado con vapor a 175 °C (448,15 K) y

9 atm (882,60 kPa), luego es hidrolizado mediante la acción de enzimas celulasas. En este subsistema también se generan residuales líquidos que contienen furfural y lignina como productos de interés, además se obtiene un sólido residual.

Subsistema IX: Obtención de Furfural: El condensado de furfural, proveniente del pretratamiento ácido del bagazo, se enfría y seguido se destila para obtener furfural en una concentración del 94%.

Subsistema X: Obtención de Lignina: En esta etapa se aprovecha el líquido rico en lignina, proveniente del pretratamiento básico del bagazo, para separar la lignina, esto se logra con una etapa de destilación.

Cálculo de la exergía

La exergía de cada corriente en el sistema se calcula como la suma de la exergía física y química:

$$e = e^{PH} + e^{CH} \quad (1)$$

Si se desprecian los componentes cinéticos y potenciales, la exergía física se calcula por la siguiente expresión:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2)$$

La exergía física depende de la temperatura entre la materia y el medio ambiente, lo que se denomina exergía térmica.

La exergía química se define como el máximo trabajo que se obtiene cuando se lleva una sustancia del estado ambiental al estado muerto por un proceso, involucrando transferencia de calor e intercambio de sustancia solamente con el medio ambiente.¹³

La exergía química coincide con la disminución de la función de Gibbs en el valor y como estado coincide con el cambio del estado ambiental al estado muerto o de referencia.

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

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

$$e^{CH} = \left(\frac{1}{M_{sol}}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot \varepsilon_i^{-0} + RT_0 \sum_{i=1}^n y_i \cdot \ln a_i \right] \quad (3)$$

Donde el primer término representa la exergía estándar química de los componentes puros y el segundo la destrucción de exergía del proceso de disolución. Las exergías de las soluciones de sacarosa y glucosa se determinan de acuerdo a lo reportado en las referencias, 1, 10, 13. Las exergías de las soluciones etanol-agua, tales como etanol hidratado y etanol extrafino se calculan de acuerdo a los procedimientos descritos en 5, 6, 8. Para el cálculo de las exergías químicas de corrientes tales como el vino a fermentar, vinazas y flemazas de la destilación y licores producto de la hidrólisis del bagazo; se consideran como soluciones ideales y en la ecuación 3 en lugar del coeficiente de actividad se emplea la concentración molar, el resto de los términos se calculan de la misma forma. Esta consideración puede hacerse porque se trata de soluciones muy diluidas y los datos de coeficiente de actividad no se encuentran 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 18 y la exergía del bagazo fue determinada de acuerdo al

procedimiento reportado en 5, 6 y 17. Las exergías calculadas se compararon con las reportadas en diferentes bibliografías, 1, 2, 5, 6 y 17. Los trabajos tomados como referencia los procesos evaluados se encontraban en similares condiciones a las tratadas en este.

Aunque el análisis exergético minimiza las ineficiencias de un sistema o proceso, no considera la economía de las alternativas evaluadas, por lo que existe la posibilidad de obtener soluciones que son termodinámicamente eficaces, pero económicamente impracticables, esto conduce a la importancia de realizar un análisis exergoeconómico, lo que será abordado en un trabajo posterior.

En el caso de la levadura torula, no se encontró ninguna referencia que reportara el valor de la exergía de este producto para tecnologías similares a la estudiada en este trabajo y se calcula como se describe a continuación.

De acuerdo a ⁷, la exergía estándar de un compuesto orgánico o inorgánico identificable, e^{0}_{CH} , puede estimarse a partir de los valores de la energía libre de formación de Gibbs, $\Delta G^0_{f,298}$, del compuesto y de las exergías químicas estándar de los elementos que lo integran, según la ecuación siguiente:

$$e^{0}_{CH} = \Delta G^0_{f,298} + \sum ni * e^0_i \quad (4)$$

Donde ni y e^0_i representan el número de moles y la exergía química estándar de los elementos que lo constituyen, respectivamente. La exergía estándar de la levadura torula se determinó mediante este método.

Para el cálculo de la eficiencia y las pérdidas exergéticas en cada subsistema y en los escenarios se utilizan las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$I = \sum e_{ent} - \sum e_{sal} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\sum e_{sal}}{\sum e_{ent}} \quad (6)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

Como se explicó anteriormente para el análisis exergético se dividió el esquema integrado en diez subsistemas. Se determinaron las eficiencias y las pérdidas generadas en cada uno y en los seis escenarios definidos previamente.

En la tabla 2 se reportan los valores de exergía de todas las corrientes del esquema integrado; el análisis de los procesos que incluye cada uno es lo que determina las corrientes de entrada y salida a cada subsistema.

Según¹⁵, la fórmula química de la levadura torula es $CH_{1,82}O_{0,47}N_{0,19}$. Teniendo en cuenta los componentes de la fórmula química se buscan los datos requeridos para el cálculo de la exergía de la levadura torula. Los datos fueron tomados de ¹⁶ y se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Exergía estándar de cada componente presente en la levadura torula

Componentes	$E^0_{x_{ch}}$ (kJ/kmol)	M.M (kg/kmol)
C	410,26	12,1
H	118,05	1
O	1,985	16
N	0,36	14

$$\Delta G^0_{torula} = 541 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \quad MM = 24 \text{ kg/kmol}$$

Tabla 2. Corrientes involucradas en el análisis exergético.

Corrientes	Flujo [kg/s]	T [0C] (K)	P [atm] (kPa)	ex [kJ/kg]	Referencia	Ex [kJ/s]
Caña de azúcar	53,2	25 (298,15)	1 (98,07)	5300	2, 3	281938
Agua Imbibición	11,08	72 (345,15)	1 (98,07)	82	5,6	908,18
Agua de lavado	283	70 (343,15)	1(98,07)	54	5,6	15282
Electricidad subsistema I	-	-	-	-	2	1456
Bagazo Salida	16,12	30 (303,15)	1 (98,07)	9500	2	153113
Bagazo para Hidrolizado	0,28	30 (303,15)	1 (98,07)	9500	2	2638,89
Jugo Mezclado	47,87	35 (308,15)	1 (98,07)	2362	5,6	113083,7
Jugo a fábrica de Azúcar	46,11	35 (308,15)	1 (98,07)	2362	5,6	22108,32
Lechada de cal	0,63	25 (298,15)	1 (98,07)	1965	5,6	1239,94
Ácido fosfórico	2,1	25 (298,15)	1 (98,07)	1061	5,6	2333,22
Vapor calentamiento jugo	5,64	115 (388,15)	1,69 (165,73)	668	5,6	3772,901
Electricidad subsistema II	-	-	-	-	5,6	1250
Condensado calentamiento de jugo	5,65	115 (388,15)	1,69 (165,73)	111	13	626,93
Jugo fabricación de alcohol	9,36	35 (308,15)	1 (98,07)	2362	5,6	22108,32
Vapor de escape Múltiple efecto	5,54	115 (388,15)	1,69 (165,73)	668	13	3700,72
Electricidad subsistema III	-	-	-	-	5,6	750
Meladura	9,39	57 (330,15)	0,16 (15,69)	10090	2	94745,1
Condensado a caldera	3,35	101 (374,15)	1,69 (165,73)	53,82	5,6	180,325
Condensado MEE	3,95	101 (374,15)	1,69 (165,73)	53,08	5,6	209,66
Vapor cristalización y cocción	16,61	98 (371,15)	0,9 (88,26)	668	5,6	47205,6
Electricidad subsistema IV	-	-	-	-	5,6	375
Azúcar	3,37	25 (298,15)	1 (98,07)	17664	2	59527,7
Miel	2,47	57 (330,15)	1 (98,07)	12824	5,6	31675,3
Condensado de subsistema IV a caldera	16,61	98 (371,15)	0,9 (88,26)	111	13	1843,71
Agua dilución miel	4,64	25 (298,15)	1 (98,07)	50	5,6	232
Microorganismo	2,29E-05	25 (298,15)	1 (98,07)	82,7	Calculado	0,0019
Nutrientes	0,008	25 (298,15)	1 (98,07)	1294,07	Calculado	10,78
Hidrolizado bagazo	1,468	25 (298,15)	1 (98,07)	322	Calculado	472,7
Electricidad subsistema V	-	-	-	-	5,6	375
Vino Fermentado	16,27	30 (303,15)	1 (98,07)	2375	5,6	38641,3
CO2	0,578	30 (303,15)	1 (98,07)	0,84	Calculado	0,486
Vapor subsistema VI	4,59	115 (388,15)	1,69 (165,73)	668	13	3071,93
Electricidad subsistema VI	-	-	-	-	5,6	375
Alcohol 96oGL	0,806	25 (298,15)	1 (98,07)	29550	5,6	23825,4
Condensado a caldera	4,59	115 (388,15)	1,69 (165,73)	111	5,6	510,455
Vinazas	16,87	82 (355,15)	1 (98,07)	443	13	7475,88
Agua sistema de enfriamiento	20,6	25 (298,15)	1 (98,07)	50	5,6	1029
Vapor intercambiador de calor	0,23	100 (373,15)	1 (98,07)	169,16	Calculado	39,71
Vapor Evaporador subsistema VII	0,67	120 (393,15)	2 (196,13)	237,05	Calculado	158,95
Torula seca	0,17	30 (303,15)	1 (98,07)	32,65	Calculado	5,66
Cond Intercambiador de calor	0,23	100 (373,15)	1 (98,07)	111	13	26,06
Condensado Evaporador	0,67	120 (393,15)	2 (196,13)	200	Calculado	134,1
Efluente de separación crema levadura	0,019	30 (303,15)	1 (98,07)	55	5,6	0,6
Enzima	0,05	29 (302,15)	1 (98,07)	23,73	13	1,2
H2SO4	0,0036	29 (302,15)	1 (98,07)	1666	Calculado	5,78
NaOH	0,0063	30 (303,15)	1 (98,07)	410,71	Calculado	2,57
Etanol hidratado	0,44	30 (303,15)	1 (98,07)	4,49	Calculado	1,96
Agua	1,63	30 (303,15)	1 (98,07)	42,92	Calculado	70,31
Condensado furfural	0,00069	115 (388,15)	1 (98,07)	298,51	Calculado	0,207
Líquido de lignina	0,65	30 (303,15)	1 (98,07)	183	Calculado	119
Sólido residual	0,17	37 (340,15)	1 (98,07)	0,00026	Calculado	4,30E-05
Agua Enfriamiento furfural	16,5	30 (303,15)	1 (98,07)	50	5,6	957
Furfural	0,015	30 (303,15)	1 (98,07)	298	Calculado	4,43
Agua Enfriamiento furfural	16,5	60 (333,15)	1 (98,07)	54,81	5,6	904,4
Condensado	0,037	30 (303,15)	1 (98,07)	50	5,6	1,863
Residuo	0,67	30 (303,15)	1 (98,07)	50	5,6	33,89
Agua Enfriamiento lignina	0,922	30 (303,15)	1 (98,07)	50	5,6	53,52
Licor claro sale sedimentador	0,61	30 (303,15)	1 (98,07)	51	Calculado	34,1571
Licor claro sale centrifuga	0,016	30 (303,15)	1 (98,07)	51	Calculado	0,88
Lignina seca	0,0026	30 (303,15)	1 (98,07)	184	Calculado	0,48
Agua Enfriamiento	0,922	50 (323,15)	1 (98,07)	54,81	5,6	50,57

$$E^{\circ}\text{torula} = \Delta G^{\circ}\text{torula} + \sum y_i * E^{\circ}\text{ch} = 743,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} = 30,97 \text{kJ/kg}$$

$$c_{pm} = 0,13 * c_{p\text{levadura}} + (1 - 0,13) * c_{p\text{agua}}$$

$$c_{pm} = 3,84 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{p\text{agua}} = 4,18 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{p\text{levadura}} = 1,58 \text{ kJ/kgK} \text{ Atendiendo a que:}$$

$$\Delta H = c_{pm} * \Delta T / \Delta S = c_{pm} * \ln \frac{T}{T_0} / e^{PH} = 1,69 \text{ kJ/kg}$$

Por tanto, la exergía total para la levadura torula es 32,67 kJ/kg.

En las tablas 4 y 5 se reportan las eficiencias y las pérdidas de cada subsistema. Además, por escenario se muestra la contribución de cada subsistema a la eficiencia y pérdidas totales del esquema integrado.

Tabla 4. Eficiencia Exergética

Subsistema	Escenarios					
	1	2	3	4	5	6
	Eficiencia %					
I	90	90	90	90	90	-
II	95	98	98	98	98	-
III	98	98	98	98	98	-
IV	88	65	65	65	65	-
V	74	85	93	93	93	81
VI	76	76	76	76	76	76
VII	88	88	88	88	88	88
VIII	-	-	30	30	30	30
IX	-	-	-	-	96	96
X	-	-	-	-	50	50
Total	80	76	78	78	71	59

Tabla 5. Pérdidas exergéticas

Subsistema	Escenarios					
	1	2	3	4	5	6
	Pérdidas %					
I	46	31	56	55	30	-
II	9	2,1	4	4	1,8	-
III	2	2	2	2	1,3	-
IV	23	49	90	88	48	-
V	20	7	5	5	2,9	40
VI	15	10	18	18	10	44
VII	1	1	2	1	1	4,3
VIII	-	-	3	4	1,9	8,1
IX	-	-	-	-	0,03	0,1
X	-	-	-	-	0,08	0,4
Total	100	100	100	100	100	100

El análisis exergético muestra que los subsistemas I y IV generan las mayores irreversibilidades. En el subsistema I (extracción de jugo), se tiene para todos los escenarios un 90% de eficiencia y de un 30 - 56% de pérdidas exergéticas, lo que puede estar relacionado con pérdidas de azúcar en la etapa de extracción, así como a los altos consumos de energía eléctrica de los motores que mueven los molinos y las esteras.

Los altos consumos de electricidad son índices tradicionales y característicos para molinos electrificados de acuerdo a lo que plantea^{5 y 6}. En el caso de las pérdidas de azúcar, para disminuirlas 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^{5 y 6}, se reporta que si se emplean difusores se puede alcanzar un 99% de extracción de sacarosa.

En el subsistema IV (cristalización y cocción), las pérdidas se deben 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.

Por otro lado, las pérdidas de azúcar que tienen lugar en la separación de la miel final también influyen en la generación de las irreversibilidades del subsistema IV, para el mismo se puede apreciar en la tabla 5, una dispersión en los resultados de por ciento de pérdidas exergéticas teniéndose valores de 23, 49 y 48% para los escenarios 1, 2 y 5 respectivamente y de 88 y 90% para los escenarios 3 y 4.

En los escenarios 3 y 4, se incluye la obtención de etanol a partir de los sustratos miel, jugo e hidrolizado de bagazo, de manera que se tiene un mayor consumo de recursos, tanto materiales como energéticos en el esquema integrado que significan en nuevas demandas de calor, agua y generación de residuales con materiales que pudieran ser recuperados. A lo anterior, se suma que en este trabajo los procesos de los escenarios evaluados operan sin integración energética, por lo que el consumo de vapor de escape aumenta y no hay aprovechamiento de corrientes que son desechadas al medio con calidad térmica, lo que conduce a que las mayores pérdidas se concentren en los escenarios 3 y 4.

Siguiendo con este análisis para el subsistema IV, también se puede apreciar que en el escenario 5 se reducen las pérdidas hasta 48% debido a que en este se recuperan los coproductos furfural y lignina de los licores que se generan en las etapas de pretratamiento del bagazo, mostrando este resultado las ventajas de la integración de procesos y la valorización de las corrientes residuales.

Por otro lado, los subsistemas V y VI, fermentación y destilación respectivamente, siguen en orden decreciente en cuanto a las pérdidas exergéticas a los subsistemas I y IV. En este caso las pérdidas se deben a ineficiencias en el proceso de fermentación dadas por las reacciones químicas y la disipación de calor por la naturaleza exotérmica de las reacciones, así como problemas en la transferencia de calor y masa en la etapa de destilación. En ese sentido otros autores han reportado que se pueden lograr mejoras en estas etapas si se incrementa la concentración de etanol en el vino fermentado, lo que reducirá los requerimientos térmicos de esa etapa y eso puede lograrse con un mejor control en los fermentadores³. A esto último se atribuye la reducción en las pérdidas que se tiene para los escenarios del 2 al 5, en los que se fermenta con otros sustratos además de la miel, para los que se han reportado valores de hasta 6% alcohólico en el vino. Otra de las mejoras que se reportan para esta etapa es el uso de la fermentación extractiva.¹³ En la literatura se reporta que, en el caso de la destilación, pueden lograrse mejoras con una mejor integración térmica en el proceso tecnológico como es el caso de esquemas de destilación doble efecto^{5 y 6} y el empleo de sistemas de pervaporación³.

En el escenario seis sólo están representados los subsistemas del V al X, ya que los relacionados con el proceso de fabricación de azúcar no tienen lugar, este escenario se

tiene en el período de no zafra. En este caso las mayores pérdidas se encuentran en los subsistemas de fermentación y destilación de alcohol y se debe a las ineficiencias que se tienen en estas etapas del proceso y que fueron descritas anteriormente.

Debe señalarse también en este análisis que la eficiencia exergética total se encuentra entre 71-80% para los escenarios del 1 al 5 y en 59% para el escenario de tiempo de no zafra.

CONCLUSIONES

1. El análisis de los subsistemas mostró que las mayores pérdidas exergéticas se tienen en el subsistema I, extracción del jugo, generando pérdidas entre 30-56%; el subsistema IV, cocción y cristalización con pérdidas entre 23-49% y el subsistema V, fermentación en el que para el escenario 1 se tienen pérdidas que representan el 20% de las pérdidas totales.
2. El análisis exergético mostró que no existen diferencias significativas en las eficiencias exergéticas en los escenarios del 1-4 estando entre valores del 78-80%, lo que es favorable para integrar la fábrica de azúcar a otros procesos tales como alcohol a partir de jugo, miel e hidrolizado de bagazo y producción de torula a partir de las vinazas; tecnologías evaluadas en los escenarios señalados.
3. Cuando se incluyen nuevos productos tales como el furfural y la lignina, escenario 5, se tiene un esquema de mayor complejidad tecnológica y la eficiencia exergética disminuye hasta 71%, debido a que se incurren en mayores pérdidas por la inclusión de etapas en las que tiene un rol fundamental las reacciones químicas y la transferencia de calor y masa.
4. En el escenario 6 los subsistemas que generan las mayores pérdidas por irreversibilidad son la fermentación y la destilación debido a ineficiencias en la fermentación y la transferencia de masa y calor en la destilación.

REFERENCIAS

1. Albernas-Carvajal, Y.; Corsano, G.; Morales, Z. M.; González-Cortés, M.; Santos, H. R.; González, S. E. Optimal design for an ethanol plant combining first and second-generation *Technologies*. *Ciencia Tecnología y Futuro (ct&f)*. **2014**, 5, 97-120.
2. Cabrera, H. J.; Casas, L. Y.; de la Cruz, S. L.; Arteaga, L. E. Análisis Exergético del proceso de producción de Azúcar Crudo. *Centro Azúcar*. **2014**, 41, 1-13.
3. De Oliveira, Jr.S. Exergy, Green Energy and Technology. DOI: 10.1007/978-1-4471-4165-5_1, Springer-Verlag: London, 2013.
4. 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 Management*. **2007**, 48, 2978-2987.
5. Ensinas, A.; Modesto, M.; Nebra, S.; Serra L. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy*. **2009**, 34, 680– 688.
6. Ensinas, V.; Nebra, S. Exergy analysis as a tool for sugar and ethanol process. In: *Handbook of exergy, hydrogen energy and hydropower research*; Péliissier, G., Calvet, A., Ed.; New York: 2009; p 125-160.
7. Kotas, T. J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger Publishing Company. Butterworths, London: 1995.
8. Modesto, M.; Nebra, S.; Zemp, J. A proposal to calculate the exergy of non ideal mixtures ethanol and water using properties of excess. In: *Proceedings of 14th European biomass conference and exhibition*; Biomass for energy, industry and climate protection, (Paris), France, October 17-21, 2005.
9. Mosqueira, K. Water use and exergetic analysis in the integrated production of first and second generation ethanol from sugarcane. Master thesis. Mechanical Engineering School, University of Campinas, 2012.
10. Nebra, S.; Fernández-Parra, M. The exergy of sucrose and water solutions: proposal of a calculation method. In: *Proceedings of ECOS 2005 18th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems*, Trondheim, Norway, June 20-22, 2005.
11. Ojeda, K.; Kafarov, V.; Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol. *Chemical Engineering Journal*. **2009**, 154, 390 - 395.
12. Ojeda, K.; Sánchez, E.; Kafarov, V. Sustainable ethanol production from lignocellulosic biomass and application of exergy analysis. *Energy*. **2011**, 36, 2119-2128.
13. 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*. **2013**, 62, 46-61.
14. Pham, V.; El-Halwagi, M. Process synthesis and optimization of biorefinery configurations. *AIChE Journal*. **2011**, 58, 1234-1243.
15. Saura, G.; Otero, M. A.; Martínez, J. A.; Fundora, N.; Reyes, E.; Vasallo, M. C.; Almazán, O. A. Propagation of yeast biomass from distillery wastes. Process and product evaluation. *Int. Sugar J.* **2003**, 105, 36-46.
16. Snkaranarayanan, K.; Van Der Kooi, H.; Arons, J. D. Efficiency and Sustainability in the Energy and Chemical Industries. Scientific Principles and Case Studies, 2nd ed.; Green Chemistry and Chemical Engineering, CRC Press, Boca Raton, FL: 2010.
17. 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, October 17-21, 2005.
18. Szargut, J.; Morris D.; Steward F. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere Publishing Corporation: New York, 1988.
19. Velásquez-Arredondo, H.; De Oliveira, Jr S.; Benjumea P. Exergy efficiency analysis of chemical and biochemical stages involved in liquid biofuels production processes. *Energy*. **2012**, 41, 138-145.