

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE BALANCE EXERGÉTICO EN COLUMNAS DE DESTILACIÓN ALCOHÓLICA

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXERGETIC BALANCE METHODS IN ALCOHOLIC DISTILLATION COLUMNS

Arletis Cruz Llerena¹, Osney Pérez Ones^{1} y Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas¹*

¹Grupo Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", (CUJAE). Ave 114 #11901 e/Ciclovía y Rotonda, La Habana, Cuba.

Recibido: Agosto 16, 2016; Revisado: Diciembre 8, 2016; Aceptado: Diciembre 19, 2016

RESUMEN

Se presenta la comparación de tres métodos para el cálculo de la exergía de las corrientes involucradas en el balance exergético de columnas de destilación alcohólica, considerando la exergía de las corrientes como: 1) exergías de flujo, 2) exergías del calor y 3) la suma de la exergía de flujo y la exergía química. Se examina la implementación del análisis exergético como un punto clave para mejorar la eficiencia del proceso. Se analiza un caso de estudio donde se aplican los métodos para la evaluación de la exergía, en el que se obtuvieron diferencias entre los métodos, del orden del 15-30 %. Se determinó la influencia de las columnas estudiadas en la pérdida total de capacidad de trabajo, demostrando que independientemente del método que se emplee la columna destiladora es la de mayores pérdidas. Usando el primero de los métodos, se realizó un análisis económico del efecto del aumento del porcentaje de etanol en el vino de 5,8 °GL hasta 9,0 °GL, lo que provocó una disminución del consumo de vapor de un 23,66 %, un incremento del rendimiento exergético en un 28,02 % y una reducción del flujo de gases de combustión de 24 627 034,4 m³/a.

Palabras clave: exergía, columnas, destilación, etanol.

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: Osney Pérez, Email: osney@quimica.cujae.edu.cu

ABSTRACT

The comparison between three methods to calculate the exergy of the currents involved in the exergetic balance of alcoholic distillation columns is presented. Exergy of the currents was considered as: 1) flow exergies, 2) heat exergies and 3) the sum of flow exergy and chemical exergy. The implementation of the exergetic analysis was examined as a key point to improve the efficiency of the process. A case study, where the methods are applied for the evaluation of the exergy is analyzed; differences among the methods were obtained between the 15% and 30 %. The influence of the studied columns in total work capacity loss was determined, concluding that regardless of the method, the distillation column has shown the higher loss. An economic analysis was made applying the first method to the case study, where the percentage of ethanol in wine increases from 5.8 °GL to 9 °GL, which led to a decrease of vapor consumption of 23.66%, an exergetic yield increase of 28.02 % and a combustion gas flow reduction of 24 627 034.4 m³/year.

Key words: exergy, columns, distillation, ethanol.

1. INTRODUCCIÓN

El alcohol etílico obtenido por vía fermentativa a partir de la caña de azúcar es de gran utilidad. Sus múltiples aplicaciones hacen que tenga una gran demanda, por lo que resulta importante el incremento de su producción de manera eficiente (Cruz, 2016).

Aunque el vino es una mezcla multicomponente obtenida en la fermentación alcohólica, a los efectos de los cálculos energéticos puede considerarse como una mezcla binaria etanol-agua. Esto es posible dado que el contenido de impurezas en el alcohol bruto es del orden de 10⁻³ expresado en fracción másica y todas reunidas representan menos del 1 % y frecuentemente menos del 0,5% del contenido de etanol (Pérez, 2011). En la operación de una columna de destilación pueden existir grandes pérdidas en la calidad de la energía, las que se pueden disminuir implementando dispositivos que ayuden a aprovechar la energía de la mejor manera posible. El ahorro de energía es vital y se traduce en ahorro económico. Para efectuar un análisis energético eficaz, es necesario conocer la cantidad y calidad de energía de cada corriente involucrada en la operación.

En un proceso químico intervienen varias formas y transformaciones de energía. Todas las transformaciones siguen la primera ley de la termodinámica, pero la comprensión y aplicación de la segunda no está tan extendida. La segunda ley de la termodinámica es importante, tanto para la definición de eficiencia como para la correcta cuantificación de las diferentes formas de energía que se pueden transformar en trabajo (Cruz, 2016).

La exergía es la cantidad de trabajo que se puede extraer por un consumidor de energía externo durante una interacción reversible entre el sistema y sus alrededores hasta que se ha alcanzado el equilibrio. Esta propiedad termodinámica, permite evaluar un nuevo tipo de pérdida energética no distinguida por los tradicionales métodos de análisis aplicando el primer principio de la termodinámica, donde la cantidad de energía es invariable y no se mide la pérdida de su capacidad o de su valor de uso. El método de análisis exergetico es adecuado para alcanzar el objetivo del uso eficiente de los recursos, ya que permite determinar las zonas del proceso y la magnitud real en donde

se tienen mayores pérdidas de energía. Esta información es útil en el diseño de sistemas térmicos, en la reducción de fuentes de ineficiencia en los sistemas y en la evaluación económica del sistema.

Un sistema técnico de transformación de la masa, de la energía o que involucre a ambos será eficiente energéticamente no solamente porque consuma poca cantidad de energía, sino porque utilice la energía de la calidad necesaria y no destruya innecesariamente la posibilidad de realizar trabajo de una corriente energética dada, incrementando la contaminación ambiental y elevando sus costos energéticos (Arroyave y col., 2004). La evaluación exergética, abre oportunidades de perfeccionamiento y mejoramiento de la eficiencia energética y optimización de las columnas de destilación alcohólica. Agrega a las medidas conocidas de conservación de la cantidad de la energía, vías para la disminución de las pérdidas de su calidad, basadas en el segundo principio de la termodinámica.

Existen numerosas investigaciones relacionadas con el análisis exergético en columnas de destilación alcohólica (Jiménez, 1998; Faria, 2003; Arroyave y col., 2004; Demirel, 2004; Modesto et al., 2005; Uc-May y Rocha-Uribe, 2009; Anozie et al., 2009; Ensinas et al., 2009; Velásquez y col., 2010; Gómez y col., 2011; Ojeda, 2011; Palacios et al., 2013). En este trabajo se realiza un análisis comparativo de métodos de cálculo de la exergía de las corrientes en el balance exergético para evaluar columnas de destilación alcohólica a partir del análisis de la segunda ley de la termodinámica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar cualquier propiedad termodinámica de mezclas etanol-agua se requiere determinar el estado físico-técnico en que se presenta, dado que la dependencia de la propiedad con la temperatura, la presión y la composición no es igual para todas las posibles fases. Para determinar el estado físico-técnico en mezclas etanol-agua se utiliza un algoritmo descrito por Pérez (2011), basado en la comparación inicial entre la temperatura de la mezcla, la temperatura del azeótropo y la temperatura de ebullición del agua a una presión dada. En este trabajo se empleó un método desarrollado por (Pérez y col., 2010) que permite la evaluación de las entalpías y entropías específicas para cualquier mezcla etanol-agua en las diferentes condiciones de operación, utilizando modelos obtenidos fenomenológicamente a partir de las leyes de la termodinámica y estadísticamente con STATGRAPHICS Centurion XVI (versión 16.2.04).

2.1 Entalpía

El método de cálculo para evaluar las entalpías se corresponde con el desarrollo teórico para la construcción del diagrama entalpía-composición para mezclas binarias de líquidos miscibles, utilizado previamente para el sistema etanol-agua (Pérez y col., 2010). Usa como datos iniciales la temperatura, la presión y la composición de la mezcla. Para el cálculo de la entalpía base emplea como estado de referencia para el etanol y el agua puros, la entalpía del líquido saturado igual a cero a 273 K (0 °C) y para la isoterma base se adoptó la temperatura base de 293 K (20 °C); en cuya expresión de cálculo aparece, como una de las variables independientes, el calor integral de solución. Para determinar las entalpías se emplean cuatro algoritmos (Pérez, 2011): entalpía de las

soluciones líquidas subenfriadas y saturadas, vapores saturados, mezclas húmedas y entalpías de vapores sobrecalentados.

2.2 Entropía

Se utilizan las ecuaciones y algoritmos obtenidos por (Pérez y col., 2010) para los cálculos de las entropías específicas, según los requerimientos del método para confeccionar un diagrama entropía-composición. Para el cálculo de la entropía base se seleccionó como estado de referencia para el etanol puro y el agua pura, la entropía del líquido saturado igual a cero a 273 K (0 °C). Para la isoterma base, se adoptó la temperatura base de 293 K (20 °C) por disponer de datos experimentales a dichas condiciones y además por haber sido la temperatura seleccionada para el cálculo de los modelos para la determinación de entalpía.

Para determinar las entropías de manera similar se emplean cuatro algoritmos según el estado físico-técnico de las corrientes. Para la aplicación del algoritmo de cálculo se requiere de los modelos de evaluación de la capacidad calorífica y de los coeficientes de actividad. Para la determinación de los coeficientes de actividad de la mezcla etanol-agua se utiliza la ecuación integrada de Gibbs-Duhem (Smith y Van Ness, 2007) desarrollada por Van Laar, pues es la que mejor correlaciona los datos experimentales (Pérez, 2011).

2.3 Métodos para la evaluación de la exergía de las corrientes

Para la evaluación de la exergía de las corrientes en los balances exergéticos en las columnas de destilación se tuvieron en cuenta tres métodos.

Método 1: es el más utilizado en la literatura consultada (Arroyave y col., 2004), se consideran las exergías de las corrientes como exergías de flujo.

$$e_{c(i)} = e_{f(i)} \quad (1)$$

Siendo $e_{c(i)}$: exergía de la corriente i

La exergía del flujo termomecánica o exergía de flujo de la corriente i se calcula como (Boehm, 1997):

$$e_{f(i)} = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (2)$$

Donde:

h_i, S_i : entalpía y entropía de la corriente i

T_0 : temperatura del ambiente de referencia

h_0, S_0 : entalpía y entropía de la corriente i a las condiciones del medio

Método 2: se consideran las exergías de las corrientes como exergías del calor.

$$e_{c(i)} = e_{q(i)} \quad (3)$$

La exergía del flujo de calor viene dada por (Cengel y Boles, 2008):

$$\int_I^{II} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \delta Q \quad (4)$$

Considerando constante el calor Q se define la exergía del calor de la corriente i a temperatura constante de la siguiente manera (Dincer y Rosen, 2007):

$$e_{q(i)} = Q \cdot T = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (5)$$

Donde:

δQ : calor incremental transferido desde el estado inicial (I) al estado final (II)

T: factor de eficiencia de Carnot o factor de temperatura exergética

Jiménez (1998) plantea el cálculo de la exergía del calor sustituyendo la energía en tránsito Q (calor intercambiado) por la energía acumulada en la corriente H (entalpía total) y considerando $\bar{T} = T_i$. En la ecuación 6 se muestra la expresión empleada por este autor para el cálculo de la exergía del flujo de calor.

$$e_{q(i)} = H \cdot T = m_i \cdot h_i \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad (6)$$

Donde:

m_i : masa de la corriente i

T_i : temperatura de la corriente i

Método 3: se considera el cálculo de la exergía de las corrientes como la suma de la exergía de flujo y la exergía química (Modesto et al., 2005; Anozie et al., 2009; Palacios et al., 2013).

$$e_{c(i)} = e_{f(i)} + e_{x(i)} \quad (7)$$

(Hinderink et al., 1996) proponen expresar la exergía química dividida en dos términos: exergía de la reacción y exergía de mezclado:

$$e_{x(i)} = \sum N_i \cdot e_{i \text{ nula}} + R \cdot T_0 \cdot \sum N_i \cdot \ln N_i \quad (8)$$

Donde:

$e_{x(i)}$: exergía química de la corriente i

N_i : fracción molar del componente i

R: constante universal de los gases

Esta exergía química molar estándar está disponible en la literatura (Szargut, 1989) para muchas sustancias elementales y cuando no se encuentre o se desee calcular para determinada sustancia compuesta se puede estimar a partir de la expresión (Ghanndzadeh, 2012):

$$e_{i \text{ nula}} = \Delta G_f^\circ + \sum \vartheta_i \cdot e_i^\circ \quad (9)$$

Donde:

$e_i^\circ, e_{i \text{ nula}}$: exergía química molar estándar de sustancias elementales y compuestas

ΔG_f° : energía libre de formación de Gibbs

ϑ_i : coeficiente estequiométrico de la especie i en la reacción de formación

Balance de exergía

$$\Delta L = \sum e_{c \text{ entrada}} - \sum e_{c \text{ salida}} \quad (10)$$

Donde:

ΔL : pérdida de capacidad de trabajo, exergía destruida o pérdida de exergía del sistema

e_c entrada, e_c salida, e_c residuales: exergía de las corrientes de entrada, salida y de residuales

Para el cálculo del rendimiento exergético Kotas (1995) propuso:

$$\eta_{exI} = \frac{\sum e_{c \text{ salida}}}{\sum e_{c \text{ entrada}}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\Delta L}{\sum e_{c \text{ entrada}}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Pérdidas exergéticas o grado de irreversibilidad:

$$P_{ex} = 1 - \eta_{ex} \quad (12)$$

Costos exergéticos (Jiménez, 1998):

$$C_{ex} = \frac{1}{\eta_{ex}} \quad (13)$$

Potencial de mejora exergética (Hepbasli, 2008):

$$PM_{ex} = P_{ex} \cdot \Delta L \quad (14)$$

Siendo P_{ex} , PM_{ex} : pérdidas exergéticas y potencial de mejora exergética

Para superar las limitaciones del cálculo del rendimiento exergético Ghannadzadeh (2012) propuso el cálculo del coeficiente de eficiencia exergética, pues el primero no permite diferenciar entre flujos de exergía de los productos y de los residuales y como consecuencia, sólo permite cuantificar la eficiencia del proceso relativa a las irreversibilidades y no da ningún indicador sobre las pérdidas de exergías externas.

$$\eta_{exII} = \frac{\sum e_{c \text{ salida}} - \sum e_{c \text{ residuales}}}{\sum e_{c \text{ entrada}}} \cdot 100 = \left(\eta_{exI} - \frac{\sum e_{c \text{ residuales}}}{\sum e_{c \text{ entrada}}} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

2.4 Balances en columnas

El caso de estudio desarrollado en este trabajo corresponde a las columnas destiladora sin rehervidor con recirculación, rectificadora y repasadora de la destilería Jesús Rabí. A modo de ejemplo se presentan las ecuaciones de balance de la columna destiladora sin rehervidor con recirculación (Figura 1).

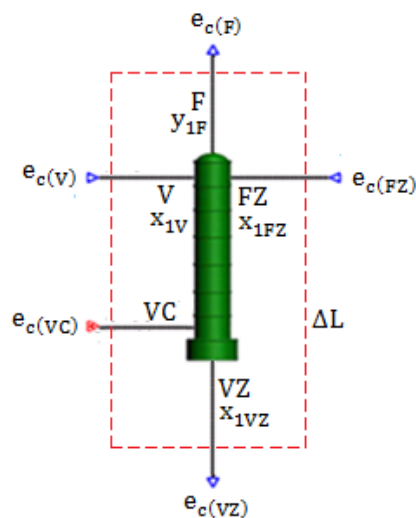


Figura 1. Símbolo en el diagrama de flujo de información (DFI) del módulo columna destiladora sin rehervidor con recirculación

2.4.1. Balance de materiales

Global

$$V + VC + FZ = F + VZ \quad (16)$$

Por componentes

$$V \cdot x_{1V} + FZ \cdot x_{1FZ} = F \cdot y_{1F} + VZ \cdot x_{1VZ} \quad (17)$$

Donde:

V, VC, VZ, F, FZ: flujos másicos de vino, vapor de calentamiento, vinazas, flemas y flemazas

x_{1V} , x_{1VZ} , y_{1F} , x_{1FZ} : fracciones molares de etanol en vino, vinazas, flemas y flemazas

2.4.2. Balance de energía

Considerando que no se realiza trabajo sobre o por el sistema y despreciando las variaciones de energía cinética y potencial y suponiendo que no hay pérdidas de calor por paredes al medio.

$$[F \cdot h_F + VZ \cdot h_{VZ}] - [V \cdot h_V + VC \cdot h_{VC} + FZ \cdot h_{FZ}] = 0 \quad (18)$$

Balance de exergía

$$\Delta L = [e_{c(V)} \cdot V + e_{c(VC)} \cdot VC + e_{c(FZ)} \cdot FZ] - [e_{c(F)} \cdot F + e_{c(VZ)} \cdot VZ] \quad (19)$$

Para la realización de los balances de exergía se tomaron los datos y resultados de los balances de materiales y energía obtenidos por Alonso (2015) utilizando el programa SIDEL (Sabadí, 2007).

2.5 Influencia de variables de la columna en el proceso

Para establecer la relación entre las variables de la columna y la economía del proceso, se varió el grado alcohólico de 5,8 °GL a 9,0 °GL (Pellegrini, 2009) para un mismo flujo de vino a la entrada de la columna de 36 846 kg/h y de flemazas recirculadas provenientes de la columna rectificadora de 1 161 kg/h; el flujo de flemas permanece prácticamente constante. Se tomó como base un índice de generación de 13,1 kg vapor/kg combustible en el generador de vapor, un precio del petróleo de 587,9 \$/t, un tiempo de operación de 24 h/d y 270 d/a de producción.

Para realizar el cálculo de los gases de combustión dejados de emitir al variar el grado alcohólico se consideró una composición del combustible fuel oil en porcentaje másico de: 10,13 % H; 6,66 % S; 81,41 % C y 0,85 % H₂O, así como un análisis Orsat de los gases de combustión producidos en porcentaje volumétrico de: 11,9 % CO₂; 0,5 % CO y 9,8 % O₂. Para un aire alimentado al generador de vapor a una temperatura de bulbo seco de 25 °C se tiene una humedad de 0,015 kg agua/kg aire seco.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados se realizó en dos direcciones comparando: 1) los métodos para la evaluación de la exergía de las corrientes y 2) el peso que representan las columnas en la pérdida total de capacidad de trabajo.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del balance de exergía aplicando los tres métodos para la evaluación de la exergía de las corrientes en las columnas destiladora, rectificadora y repasadora antes mencionadas.

Tabla 1. Balance exergético con diferentes métodos para la evaluación de exergía en columnas

| <i>Indicadores</i> | <i>Columna destiladora</i> | | | <i>Columna rectificadora</i> | | | <i>Columna repasadora</i> | | |
|---|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | <i>Método 1</i> | <i>Método 2</i> | <i>Método 3</i> | <i>Método 1</i> | <i>Método 2</i> | <i>Método 3</i> | <i>Método 1</i> | <i>Método 2</i> | <i>Método 3</i> |
| Rendimiento exergético (%) | 41,43 | 69,51 | 89,46 | 31,39 | 79,53 | 98,51 | 25,28 | 74,77 | 95,34 |
| Pérdidas exergéticas (%) | 58,57 | 30,49 | 10,54 | 68,61 | 20,47 | 1,49 | 74,72 | 25,23 | 4,66 |
| Coefficiente de eficiencia exergética (%) | 18,17 | 17,62 | 59,33 | 25,71 | 69,17 | 4,91 | 25,15 | 74,44 | 85,73 |
| Pérdidas de capacidad de trabajo (kW) | 801,66 | 515,70 | 1 954,17 | 188,63 | 74,65 | 422,33 | 222,65 | 89,49 | 435,14 |
| Potencial de mejora exergética (kW) | 469,54 | 157,24 | 205,99 | 129,42 | 15,28 | 6,30 | 166,36 | 22,58 | 20,27 |
| Costo exergético | 2,41 | 1,44 | 1,12 | 3,19 | 1,26 | 1,02 | 3,96 | 1,34 | 1,05 |

La diferencia entre los resultados del rendimiento exergético de los métodos 1 y 2 en la columna destiladora es del orden del 28 %, similar a la que se obtiene al emplear estos métodos para la evaluación de la exergía de las corrientes utilizando los datos de la columna suministrados por (Jiménez, 1998). Puede apreciarse que entre los métodos existen diferencias entre 15 y 30%, atribuibles a las diferentes consideraciones de cada método, a la sensibilidad de las propiedades de las corrientes evaluadas a las condiciones en que se encuentran y al alejamiento entre estas propiedades y las evaluadas a las condiciones del medio ambiente. Los valores obtenidos de las exergías físicas son pequeños en comparación con los de las exergías químicas, resultado similar al obtenido por (Araújo et al., 2007). Sus valores son en muchos casos de dos (Arons y Kooi, 2004) a cinco veces inferiores. Algunas corrientes presentan valores de exergía física bajos, cercanas al valor cero, debido a que se encuentran en condiciones similares a las ambientales, lo que significa que casi no poseen trabajo útil disponible respecto al ambiente de referencia (Sierra y Casas, 2011).

En la Tabla 2 se presenta el peso de las columnas de destilación del caso de estudio en la pérdida total de capacidad de trabajo, para cada método aplicado en la evaluación de la exergía de las corrientes.

Tabla 2. Peso de las columnas en la pérdida total de capacidad de trabajo

| <i>Columna</i> | <i>Método 1(kW)</i> | $\Delta Lcol/\Delta Ltot.$ (%) | <i>Método 2(kW)</i> | $\Delta Lcol/\Delta Ltot.$ (%) | <i>Método 3(kW)</i> | $\Delta Lcol/\Delta Ltot.$ (%) |
|----------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Destiladora | 801,66 | 66,09 | 515,70 | 75,86 | 1 954,17 | 69,50 |
| Rectificadora | 188,63 | 15,55 | 74,65 | 10,98 | 422,33 | 15,02 |
| Repasadora | 222,65 | 18,36 | 89,49 | 13,16 | 435,14 | 15,48 |
| Total | 1 212,94 | 100 | 679,84 | 100 | 2 811,63 | 100 |

Como puede apreciarse independientemente del método que se emplee la columna destiladora es la de mayores pérdidas, dado por la existencia de diferencias importantes de concentración y de temperatura en las condiciones de operación que influyen en la entalpía y entropía de las corrientes. En la columna destiladora la inyección de vapor en el fondo es una de las causas fundamentales del alto valor de las pérdidas de capacidad de trabajo, dada su influencia en la imperfección de la operación, resultado similar al obtenido por Jiménez (1998).

Por lo anterior se considera que para la evaluación de la exergía de las corrientes de forma comparativa, se puede aplicar cualquiera de los métodos estudiados. Se recomienda utilizar el método 2 por ser es el más sencillo en su aplicación, ya que no necesita la determinación de la entropía y el cálculo parte del propio balance de energía. En el caso de que se quiera hacer un análisis más profundo, el método 3 es el más conveniente ya que contempla tanto las interacciones termo-mecánicas como las químicas.

Para analizar la influencia de variables de la columna en la economía del proceso, se tomó el primer método de evaluación de la exergía para el caso de estudio. En la Figura 2 se muestra que con el aumento del grado alcohólico se incrementa el rendimiento exergético de la columna destiladora en un 11,61 % y se logra por una disminución del consumo de vapor y por tanto del consumo de petróleo, lo que se traduce en una reducción del costo del combustible de 23,66 %.

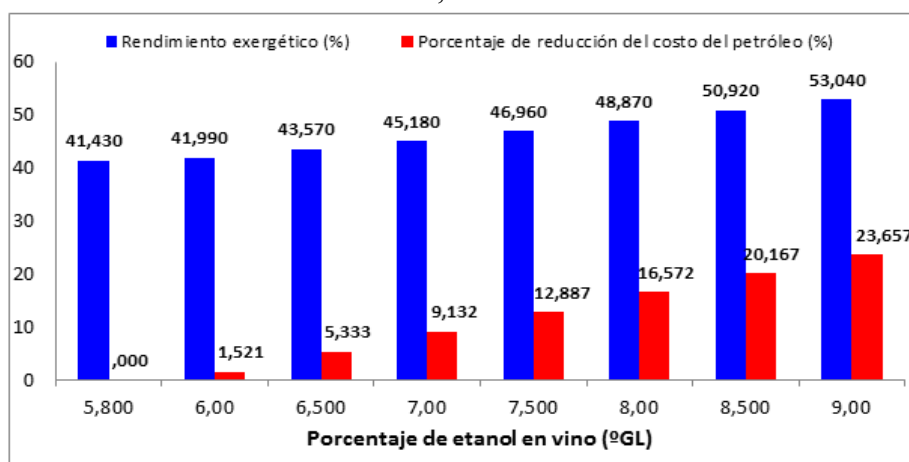


Figura 2. Comportamiento del rendimiento exergético y del porcentaje de reducción del costo de petróleo con respecto al porcentaje de etanol en vino

En la Figura 3 se muestra que con este aumento del grado alcohólico se reduce el flujo de gases de combustión emitidos por el generador de vapor en 93,95 kmol/h (4 032,9 m³/h), lo que representa 24 627 034,4 m³/a.

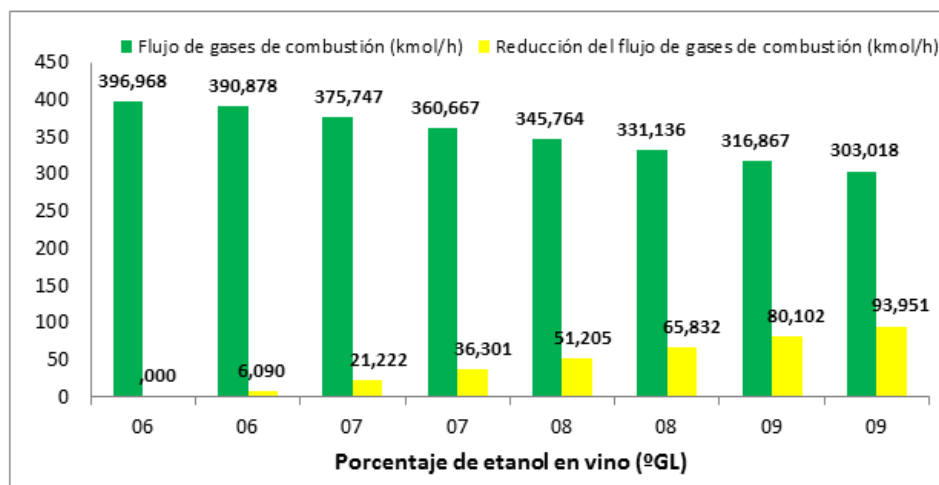


Figura 3. Comportamiento del flujo de gases de combustión emitidos con respecto al porcentaje de etanol en vino

4. CONCLUSIONES

1. Los tres métodos de evaluación de la exergía de las corrientes arrojan diferencias del orden del 15-30%, atribuibles a las diferentes consideraciones de cada método. La selección del método a emplear está en función del objetivo y la complejidad del análisis exergético a realizar.
2. El peso de las columnas en la pérdida total de la capacidad de trabajo, muestra que independientemente del método que se emplee la columna destiladora es la de mayores pérdidas.
3. Al variar el porcentaje de etanol en el vino de entrada a la columna destiladora de 5,8 °GL hasta 9,0 °GL, se incrementa el rendimiento exergético en 11,61 % y se reduce el consumo de petróleo en un 23,66 %, lo que se traduce en una reducción del costo del combustible de 1 889 075,97 \$/a y del flujo de gases de combustión emitidos por el generador de vapor en 24 627 034,4 m³/a.

REFERENCIAS

- Alonso, D., Evaluación de alternativas de mejoras energéticas y ambientales en la destilería Jesús Rabí., Tesis presentada para optar por el título de Máster en Análisis y Control de Procesos, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2015.
- Anozie, A. N., Osunleke, A. S., Osulale, F., Exergy analysis of binary plate distillation column operations., *International Journal of Exergy*, Vol. 6, No. 5, 2009, pp. 715-728.
- Araújo, A. C. B., Vasconcelos, L. G. S., Fossy, M. F., Brito, R. P., Exergetic and economic analysis of an industrial distillation column., *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 4, No. 3, 2007, pp. 461-469.

- Arons, J., Kooi, H., Efficiency and sustainability in the energy and chemical industries., Marcel Dekker Inc., New York, U.S.A, 2004, pp. 68-70.
- Arroyave, D., Suárez W., Ospina, C., González, M., Análisis energético y exergético de una torre de destilación., *Energética*, No. 32, 2004, pp. 51-62.
- Boehm, R., Developments in the design of thermal systems., First ed., Cambridge University Press, United Kingdom, 1997, pp. 149-150.
- Cengel, Y., Boles, M., Exergy: a measure of work potential. Thermodynamics An engineering approach., 6 ed., McGraw Hill, New York, 2008, pp. 440-442.
- Cruz, A., Estudio comparativo de métodos de evaluación de la exergía en columnas de destilación alcohólica., Tesis presentada para optar por el título de Ingeniero Químico, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2016.
- Demirel, Y., Thermodynamic analysis of separation systems., Chemical and Biomolecular Engineering Research and Publications, Vol. 39, No. 16, 2004, pp. 3897-3942.
- Dincer, I., Rosen, M. A., Exergy: energy, environment and sustainable development., Elsevier, Oxford, USA, 2007, pp. 27-28.
- Ensinas, A. V., Modesto, M., Nebra, S. A., Serra, L., Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane., *Energy*, Vol. 34, No. 5, 2009, pp. 680-688.
- Faria, S.H.B., Estudo energético de colunas de destilação através de análise exergética - sistemas não ideais., Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 2003.
- Ghannadzadeh, A., Exergetic balances and analysis in a process simulator: a way to enhance process energy integration., En vue de l'obtention du Doctorat, Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse (INP, Toulouse), 2012.
- Gómez, D. P., Gutiérrez, A. P., Rangel, V. H., Rivera, G., Comportamiento exergético de una torre de destilación productora de bioetanol., *Memorias del XVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Salamanca, México, 2011, pp. 1119-1128.
- Hepbasli, A., A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, 2008, pp. 593-661.
- Hinderink, A., Kerkhof F., Lie A., Arons J., Kooi H., Exergy analysis with a flowsheeting simulator – I. Theory, calculating exergies of material streams., *Chemical Engineering Science*, No. 51, 1996, pp. 4693-4700.
- Jiménez, O., Análisis exergético de un proceso de destilación de alcohol., *Energética*, Vol. XIX, No.1, 1998, pp. 17-24.
- Kotas, T.J., The Exergy method of thermal plant analysis., Krieger Publishing Company, Florida, USA, 1995, pp. 74-75.
- Modesto, M., Nebra, S. A., Zemp, R. J., A proposal to calculate the exergy of non ideal mixtures ethanol-water using properties of excess., 14th European Biomass Conference, Paris, France, 17-21 October, 2005, pp. 1924-1927.
- Ojeda, K.A., Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación., Tesis presentada en opción al grado

- científico de Doctor en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- Palacios, R., Mosqueira, K. J., Modesto, M., Ensinas, A. V., Nebra, A. S., Serra, L. M., Exergetic analysis of the integrated first and second generation ethanol production from sugarcane., *Energy*, Vol. 62, 2013, pp. 46-61.
- Pellegrini, L.F., Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada á produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade., Tese apresentada para obtenção do título de doutor em engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2009.
- Pérez, O., Modelación, simulación y análisis con fines energéticos de destilerías de etanol hidratado., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2011.
- Pérez, O., Díaz, J. L., Zumalacárregui, L., Gozá, O., Evaluación de propiedades termodinámicas de mezclas etanol-agua (I), *Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia.*, No. 52, 2010, pp. 47-61.
- Sabadí, R., Análisis de procesos en la industria azucarera: Fermentación y destilación., Taller Combustibles, Energía, Medio Ambiente y Programas para Análisis de Procesos., Red Temática IVH: Empleo de la biomasa azucarera como fuente de alimento, energía, derivados y su relación con la preservación del medio ambiente (BAZDREAM), Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, 2-4 de Mayo, 2007.
- Sierra, C., Casas, J.M., Análisis exerético de una planta de producción de biodiesel de aceite de palma., Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- Smith, J.M., Van Ness, H.C., Introducción a la termodinámica en ingeniería química., Séptima edición, McGraw Hill, New York, 2007, pp. 446-449.
- Szargut, J., Chemical exergies of the elements., *Applied Energy*, Vol. 32, No. 4, 1989, pp. 269-286.
- Uc-May, E.J., Rocha-Uribe, J.A., Análisis de exergía en columnas de destilación., *Tecnología Ciencia Educación*, Vol. 24, No. 2, 2009, pp. 117-126.
- Velásquez, H.I., Ruiz, A.A., Oliveira, S., Análisis energético y exerético del proceso de obtención de etanol a partir de la fruta del banano., *Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia*, No. 51, 2010, pp. 87-96.