

ANÁLISIS EXERGOECONÓMICO APLICADO A LA ETAPA DE HIDRÓLISIS DE LACTOSUERO

Verónica E. Capdevila, TECSE, Facultad de Ingeniería (UNICEN),
vero.capdevila@fio.unicen.edu.ar

Mauricio Arrastúa, Facultad de Ingeniería (UNICEN), marrastua@gmail.com

María C. Gely, TECSE, Facultad de Ingeniería (UNICEN), cgely@fio.unicen.edu.ar

Ana M. Pagano, TECSE, Facultad de Ingeniería (UNICEN), anamariapagano@gmail.com

Resumen— El análisis exergetico se considera una herramienta de utilidad en el ámbito del desarrollo sostenible. En paralelo al mismo, puede plantearse un análisis de costos económicos, resultando la combinación un importante método de evaluación de diferentes alternativas tecnológicas y productos. Si por otro lado se recurre a la asistencia de software para el modelado y simulación de procesos, el cálculo requerido para este tipo de análisis se agiliza convirtiéndose en una herramienta base indispensable para el estudio de sistemas complejos y sus comparaciones.

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para el análisis exergo-económico de la hidrólisis ácida del lactosuero involucrado en el proceso de obtención de bioetanol de segunda generación a partir de la combinación de residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz) y residuos lácteos. El proceso diseñado fue simulado en estado estacionario utilizando Aspen Hysys[®], involucrando la investigación de los parámetros cinéticos requeridos. Resultando la utilización de dos reactores en serie la mejor alternativa desde el punto de vista exergoeconómico para alcanzar el objetivo deseado.

La aplicación de la metodología que se propone para el análisis de esta etapa del proceso constituye un primer paso con vistas al análisis exergo-económico del proceso completo de obtención de bioetanol a partir de estos residuos, habilitando el análisis de mejora y optimización del proceso global.

Palabras clave— *análisis de procesos, exergía, costos, lactosuero, bioetanol de segunda generación.*

1. Introducción

La disposición final de los residuos de alimentos constituye el eje de estudio de diferentes investigaciones que buscan mitigar la contaminación ambiental generada. Sin embargo, es posible el aprovechamiento y agregado de valor a esos residuos orgánicos destinándolos a la producción de biocombustibles renovables –como el bioetanol-

evitando el daño ambiental y contribuyendo a la generación de energías alternativas sustentables.

El bioetanol es el biocombustible más ampliamente utilizado para el transporte en todo el mundo [1]. Se puede obtener tanto a partir de la fermentación alcohólica de productos con alto contenido de azúcares y almidón, como también a partir de tecnologías sustentables que utilizan biomásas residuales de la industria de alimentos.

En este caso el bioetanol es denominado de “segunda generación” dado que queda fuera de la controversia entre destinar los alimentos para el consumo humano o para la generación de energía.

Entre los residuos de la industria alimenticia, el lactosuero que se genera en las industrias lácteas constituye una problemática medioambiental importante, debido a los altos volúmenes producidos y su alto contenido de materia orgánica [2]. Con frecuencia, se desecha de manera inadecuada, perjudicando la estructura física y química de los suelos, disminuyendo su productividad y causando serios problemas a las aguas residuales y ambientales, llevando a la destrucción de la fauna y flora acuática. Una solución que aparece promisorio es emplearlo para producir bioetanol.

La obtención de bioetanol de segunda generación a partir de residuos de producción de alimentos implica un pre-tratamiento durante el cual se adecúa la materia prima a utilizar, para luego llevar a cabo las etapas de hidrólisis y fermentación, que pueden desarrollarse en forma simultánea o por separado, dependiendo de la materia prima y la tecnología a utilizar. La última etapa del proceso es la separación por destilación de la mezcla obtenida para obtener el bioetanol purificado.

Considerando la etapa de la hidrólisis del lactosuero, se tiene en cuenta que el carbohidrato presente en el lactosuero es la lactosa, un disacárido que cuando es sometido al proceso de hidrólisis proporciona glucosa y galactosa. Luego a partir de un proceso fermentativo de estos monosacáridos se obtiene el bioetanol.

Dada la baja concentración de lactosa en el suero (aproximadamente 5% p/p), para enriquecerlo suele recurrirse a combinarlo con otras biomásas como los residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz, cebada).

Considerando otro aspecto interesante, el análisis exergético permite mejorar y optimizar procesos o sistemas a través del estudio de la eficiencia energética de un sistema aplicando las leyes de la termodinámica y representando un significativo indicador en la comparación de fuentes de energía renovables. Si además, se evalúan los costos económicos se puede efectuar un análisis exergoeconómico. El análisis de costos basado en exergía tiene como objetivo determinar los costos de los productos e irreversibilidades (exergía destruida) generadas en los procesos considerando que los costos son función del contenido de exergía de cada flujo del proceso estudiado. La combinación de exergía con conceptos económicos se denomina análisis exergoeconómico cuando se emplean los costos de exergía [3]. Este análisis resulta un importante método de evaluación de diferentes alternativas tecnológicas y productos.

Por otro lado, si se recurre a la asistencia de software para el modelado y simulación de procesos, el cálculo requerido para este tipo de análisis se agiliza convirtiéndose en una herramienta base indispensable para el estudio de sistemas complejos y sus comparaciones. Es decir, que desde el punto de vista de los procedimientos de modelado, simulación y optimización de sistemas energéticos, el análisis exergoeconómico agrega, básicamente, dos conjuntos de ecuaciones:

- los saldos de costos para los componentes / equipos o procesos, y
- los criterios de partición de costos basados en la exergía [3].

En base a lo antes expuesto, en el presente trabajo se llevó cabo el desarrollo de un modelo de simulación en Aspen Hysys para la etapa de hidrólisis ácida de lactosuero correspondiente al proceso de obtención de bioetanol de segunda generación a partir de la combinación de residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz) y residuos lácteos [4]. La generación de este modelo involucró la investigación de los parámetros cinéticos requeridos, dimensionamiento del mismo y principales resultados de conversión de la reacción de hidrólisis del lactosuero. Luego se desarrolló una metodología para el análisis exergo-económico para dicha etapa, considerando previamente el cálculo de exergías para las corrientes involucradas y los costos necesarios.

2. Materiales y Métodos

2.1 Desarrollo del modelo de simulación de la hidrólisis del lactosuero

El desarrollo del modelo implicó la simulación en Aspen Hysys[®] de la etapa de hidrólisis ácida del lactosuero del proceso de bioetanol generado a partir de residuos lignocelulósicos.

La escala del proyecto se definió teniendo en cuenta la generación de lactosuero en la región de influencia de la UNICEN representada por 4653 kmol/h [5].

En lo que respecta al desarrollo de la simulación, para la definición de las corrientes de alimentación y de la reacción involucrada en el proceso, se debió definir el compuesto hipotético *Galactosa* debido a que no se encuentra disponible en la Librería de Aspen Hysys[®]. La definición de este componente se basó en la definición de la estructura UNIFAC y en sus propiedades fisicoquímicas tales como peso molecular, punto de ebullición normal y propiedades críticas.

Se seleccionó el modelo termodinámico NRTL como adecuado para estimar las propiedades de las sustancias, estimándose los coeficientes binarios vapor-líquido mediante UNIFAC.

Sobre esta base se construyó el modelo de simulación de la etapa correspondiente a la hidrólisis ácida del lactosuero. Se consideró al lactosuero compuesto por un 95% en peso de agua y 5% en peso de lactosa.

2.2 Ensayos

Respecto a los parámetros cinéticos involucrados en la reacción de hidrólisis, previamente se realizaron experiencias a escala laboratorio para determinar la constante cinética de la hidrólisis de la lactosa. Las experiencias se basaron en el diseño experimental propuesto por López Ríos [6] para hidrólisis ácida del suero de leche. Se utilizó un reactor batch de 300 mL con agitación continua termostatazado a una temperatura de 80°C, empleando ácido clorhídrico como catalizador a una concentración de 3 g de HCl/1000 g de lactosa. El seguimiento de la reacción se llevó durante 2 h extrayendo muestras de la mezcla reaccionante a intervalos regularmente espaciados cada 10 minutos. El grado de hidrólisis de la lactosa se cuantificó mediante un método clínico alternativo –validado por la técnica

de crioscopia- el cual está basado en el uso de un analizador automático de glucosa mediante tiras reactivas [7].

Por otro lado, se puede considerar el balance del costo exergoeconómico de cualquier equipo individual considerando los costos monetarios de la exergía de los flujos del proceso. Es decir, que se puede definir el costo exergoeconómico de un flujo de salida como la suma del costo monetario de la exergía de la corriente de entrada y los costos originados en el proceso productivo (en este caso el reactor) para su obtención (capital, operación, mantenimiento, etc) [8].

En líneas generales el balance exergoeconómico en U\$\$/h queda determinado por:

$$C_e * B_e + Z = C_s * B_s \quad (1)$$

donde

C_e: costo exergoeconómico unitario de la corriente de entrada

B_e: exergía de la corriente de entrada

Z: costos no energéticos (incluyen costo capital de instalación, de operación y de mantenimiento)

C_s: costo exergoeconómico unitario de la corriente de salida

B_s: exergía de la corriente de salida.

Es de importancia mencionar que en este caso el cálculo del costo del reactor está basado en la ecuación de Turton [9].

$$\log_{10} C = K_1 + K_2 \log_{10}(A) + K_3 [\log_{10}(A)]^2 \quad (2)$$

Donde

C: Costo del equipo

K₁, K₂, y K₃: constantes características de cada equipo

A: parámetro de capacidad o tamaño del equipo.

3. Resultados y Discusión

3.1 Simulación de la etapa de hidrólisis ácida de lactosuero

El modelo de reacción validado experimentalmente fue utilizado como insumo para el diseño del reactor de hidrólisis del proceso simulado en Aspen HYSYS[®]. El valor de la constante cinética resultó ser 0,017 1/min [7]. El reactor utilizado es un RTAC de mezcla completa, que trabaja isotérmicamente a 80°C, sin caída de presión y grado de llenado 100% (Fig. 1). La simulación del reactor de hidrólisis arroja como resultado un reactor de 200 m³ para una conversión del 69,97% del total de lactosa contenida en el lactosuero, dando como producto una fracción molar de 0,0019 de glucosa y 0,0017 de galactosa. Dichos porcentajes corresponden a un total de 1620,4 kg glucosa/h y 1458,4 kg galactosa/h. El total de lactosa no hidrolizada es de 1321,2 kg/h.

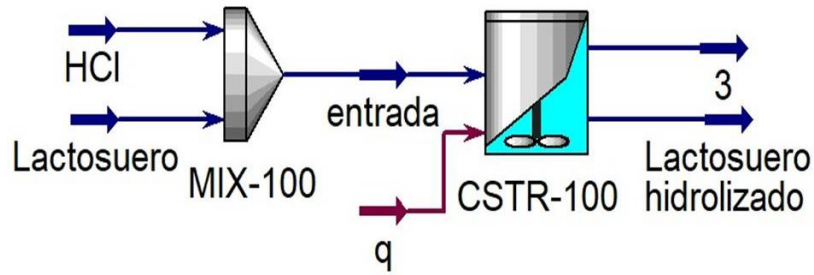


Figura 1. Simulación etapa hidrólisis ácida de lactosuero en un RTAC.
Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de reducir los costos involucrados en equipamiento, se llevó a cabo la simulación de la hidrólisis en dos reactores RTAC idénticos en serie (Fig. 2), con las mismas características que el reactor descrito anteriormente. El volumen de cada reactor para una conversión del 70% es de 71 m^3 , dando un volumen total de 142 m^3 . Dicho volumen total representa una disminución del 29% del volumen respecto al obtenido para un solo reactor RTAC.

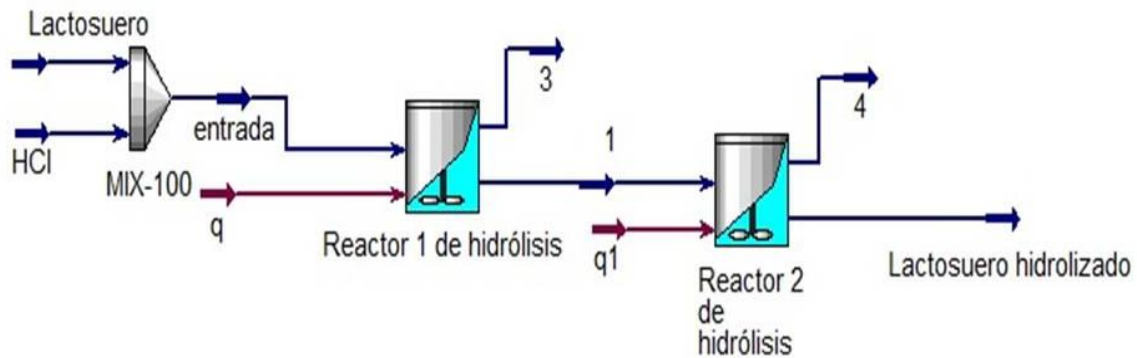


Figura 2. Simulación etapa hidrólisis ácida de lactosuero en un RTAC.
Fuente: elaboración propia.

3.2 Análisis exergoeconómico

El análisis exergoeconómico se realizó tanto para el sistema formado por un RTAC como para el sistema formado por dos RTAC en serie, empleando la Ec. 1. Para el mismo se tuvo en cuenta la exergía de la corriente de entrada, considerando el lactosuero y al catalizador (HCl). Para el cálculo de la misma se consideró que la exergía total de la corriente de entrada está compuesta por exergía física y exergía química (la exergía potencial y la exergía cinética se consideran despreciable).

De la simulación se obtiene la exergía física cuyo valor es 16.47 KJ/Kg , mientras que la exergía química se calculó considerando la exergía estándar de cada compuesto y las fracciones molares, obteniéndose un valor de 95.61 KJ/Kg . El valor de la exergía total de la corriente de entrada resultó ser 112 KJ/Kg . Para ambas simulaciones la exergía correspondiente a la corriente de entrada es la misma.

También, se consideraron los costos monetarios correspondientes al lactosuero y al catalizador. Resultando el producto del costo exergoeconómico unitario de la corriente de entrada y la exergía de dicho flujo igual a 1357383,11 U\$\$/h.

Por otro lado, a partir de la Ec. 2 y considerando K_1 : 3.4974, K_2 : 0.4485 y K_3 : 0.1074 [10] se obtuvo que el costo del reactor es de 87081 U\$\$ actualizado a 2017 (con un índice de 567.5 [11]).

Utilizando la Ec. 1 y considerando que el reactor tendrá una vida útil de 10 años se obtiene que costo exergoeconómico unitario de la corriente de salida por la exergía de dicha corriente es 1357385 U\$\$/h, este valor es necesario para un posterior análisis exergoeconómico del reactor de fermentación (etapa contigua de la hidrólisis de lactosuero) en el que se obtiene el bioetanol deseado. Idéntico análisis se realizó para la combinación de los reactores en serie, resultando 68969 U\$\$ el costo de ambos reactores y el costo exergoeconómico unitario de la corriente de salida por la exergía de la corriente resulto ser 1357384 U\$\$/h.

Al comparar ambas simulaciones resulta que el costo exergoeconómico unitario de la corriente de salida por su exergía resulta levemente menor para la combinación de dos RTACs en serie, donde el volumen de ambos reactores es menor y la conversión obtenida es del 70%.

4. Conclusiones y recomendaciones

A partir de la obtención del valor experimental de la constante cinética para la etapa de hidrólisis ácida del lactosuero (0.017 l/min) se realizó la simulación de dicha etapa en Aspen Hysys®, considerando un reactor RTAC y la combinación de dos reactores RTACs en serie. Resultando la segunda opción aquella que genera un menor costo exergoeconómico unitario de la corriente de salida por su exergía, compuesta por glucosa y galactosa, (insumo para el reactor de fermentación en la producción de bioetanol de segunda generación a partir de lactosuero combinado con cascarilla de arroz pretratada). El volumen de ambos reactores obtenido fue de 71 m³ cada uno y la conversión de la reacción del 70%.

Es importante destacar que los resultados obtenidos en el presente trabajo resultan la base para el análisis exergoeconómico del proceso completo de obtención de bioetanol a partir de estos residuos, permitiendo optimizar, desde este punto de vista el proceso global.

5. Referencias

- [1] BALAT M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n.2, p. 858-875.
- [2] GUIMARÃES P.M.R., TEIXEIRA J.A., DOMINGUES L. (2010). Fermentation of lactose to bioethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnology Advances*, v. 28, p.375–384.

- [3] S. DE OLIVEIRA JR. (2013). Chapter 2: Exergy, Exergy Costing, and Renewability Analysis of Energy Conversion Processes. *Exergy, Green Energy and Technology, London*, v.14, p.5-53.
- [4] CAPDEVILA V., KAFAROV V., GELY M., PAGANO A.M. (2016). Valorization of waste food industry for producing second generation bioethanol. *Advanced Materials Research*, v. 1139, p. 33-39.
- [5] INTI. (2013). “Utilización actual del suero de quesería”, Ministerio de Industria. Presidencia de la Nación Argentina.
- [6] LOPEZ RIOS C.A., HERRERA PENAGOS S.N., RUIZ COLORADO A.A., MEDINA DE PEREZ V.I. (2006). Producción de ácido cítrico con *Aspergillus niger* NRRL 2270 a partir de suero de leche. *Dyna*, v.73,n. 150, p. 39-57.
- [7] ARRASTÚA M., CAPDEVILA V., GELY M.C., PAGANO A.M. (2016). Bioetanol sustentable: estudio cinético y modelado de la hidrólisis de lactosuero como primera etapa del proceso productivo. *The Journal of The Argentine Chemical Society*, v. 103, p.1-2.
- [8] TORRES GONZALEZ E. V. (2004). *Estudio del funcionamiento del sistema de enfriamiento de una central termoeléctrica mediante el análisis exergoeconómico*. México, Instituto Politécnico Nacional, p. 175.
- [9] TURTON, R., BAILIE, R. C., WHITING, W. B. & SHAEIWITZ, J. A. (2007). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. 2nd. Edition. New Jersey. Prentice-Hall.
- [10] VÁZQUEZ, R., ARRIAGA, M. J., ALCÁNTARA, M. Del Consuelo y MOZALVO, F. (2017). Evaluación técnico-económica de reactores químicos homogéneos usando la herramienta computacional Excel. *Revista de Sistemas Experimentale*, v. 4, n.13, p.38-49.
- [11] CHEMICAL ENGINEERING. Extraído de: <http://www.chemengonline.com/cepci-updates-january-2018-prelim-and-december-2017-final/>