

Aplicación de la termodinámica en la síntesis óptima de procesos químicos y biotecnológicos

Héctor Forero ¹, Carlos García ¹, Carlos Cardona ¹

¹ Instituto de Biotecnología y Agroindustria, Departamento de Ingeniería Química,
Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

haforeroh@unal.edu.co caagarciave@unal.edu.co, ccardonaal@unal.edu.co

Recibido: 17-09-2015. Aceptado después de revisión: 23-11-2015

Resumen: La biomasa aparece como una alternativa promisoriosa para la producción amigable de compuestos con importantes ventajas competitivas sobre componentes no renovables. El bio-furfural es uno de estos compuestos y actualmente se ha convertido en uno de los componentes más importantes y comúnmente utilizados en el mundo. Alternativamente, el bio-furfural ha sido utilizado como base para el desarrollo de plataformas químicas con el fin de producir otros componentes de interés industrial. Este trabajo implementa el análisis termodinámico de la producción de furfural en una biorefinería a partir de biomasa lignocelulósica. Para determinar la viabilidad económica y energética de este proceso se realizaron evaluaciones tecno-económicas de las diferentes tecnologías utilizadas en la biorefinería, además de diferentes análisis energéticos y exergéticos. Como resultado, la producción de furfural a partir de bagazo de caña de azúcar bajo el concepto de biorefinería tiene una alta viabilidad económica, además de obtener otros productos que pueden ser utilizados para incrementar el rendimiento económico de la biorefinería. Adicionalmente, se determinaron las plantas o secciones del proceso con mayores requerimientos energéticos e irreversibilidades, entre las cuales se encuentran los procesos de hidrólisis alcalina y enzimática con las más altas irreversibilidades, sin embargo, las plantas de producción de furfural y etanol tienen los más alto consumos energéticos relacionados con la etapa de reacción y separación, respectivamente.

Palabras claves: biorefinería, energía, exergía.

Abstract. Biomass appears as a promising alternative to produce environmentally friendly compounds with competitive advantages over non-renewable compounds. Bio-furfural is one of these compounds, and currently has become one of the most important and commonly used worldwide compounds. Alternatively, bio-furfural has been used as a building block to develop chemical platforms in order to produce some other compounds of industrial interest. This work implements the thermodynamic analysis of furfural production in a biorefinery from lignocellulosic biomass. Techno-economic, energy and exergy are evaluated in order to determine the economic and energy viability of this process. As a result, the production of furfural from sugarcane bagasse under the biorefinery concept has high economic profitability, besides other products can be used to increase the economic performance of the biorefinery. Additionally, plant or process sections with higher energy requirements and irreversibilities are determined. Alkaline and enzymatic hydrolysis were the processes with the highest irreversibilities, however, the plants for furfural and ethanol production has the highest energy needs related to the reaction and separation stage, respectively.

Keywords: biorefinery, energy, exergy.

1. Introducción

La incertidumbre de las reservas y precio del petróleo así como el cambio climático se han convertido en las principales razones para buscar nuevas alternativas para la producción de combustibles y productos químicos de alto valor [1]. En este sentido, la biomasa aparece como una fuente promisoriosa para la producción amigable de biocombustibles y materiales de base biológica. Los residuos lignocelulósicos (compuestos principalmente de celulosa (30-45%), hemicelulosa (20-35%) y lignina (10-20%)) son considerados como una materia prima promisoriosa para obtener una amplia gama de productos debido a su alta disponibilidad y bajo valor económico. El desarrollo

de esquemas de biorefinerías a partir de esta biomasa lignocelulósica puede realizarse en muchas direcciones y enfocándose, especialmente, en los azúcares derivados que pueden ser utilizados como una plataforma de productos químicos [2]. Este es el caso del furfural, que se puede obtener a partir de la hidrólisis ácida de estos residuos lignocelulosicos y cuya principal aplicación es en la producción de alcohol furfurílico, el cual representa un 88% de su aplicación final. Entre otros de los usos del furfural se encuentran la extracción de butadieno (5%) y el remanente (7%) es utilizado en la producción de intermediarios químicos, farmacéuticos y saborizantes [3]. El furfural ofrece una importante y rica fuente de derivados que tienen un uso potencial como componentes de biocombustibles. Varios autores han estudiado la producción de furfural bajo el concepto de biorefinerías. Gnansounou [4] evaluaron la optimización del proceso de producción de furfural a partir de los racimos vacíos de la palma de aceite (EFB, por sus siglas en inglés) utilizando un pretratamiento con ácido sulfúrico diluido seguido por un proceso de deshidratación sin utilizar un catalizador adicional. A partir de las condiciones óptimas del proceso de deshidratación (198°C y 11 minutos de tiempo de residencia), se obtuvo un rendimiento de furfural de 57.6 g/kg de EFB seco. *Aristizábal et al.*, [5] evaluaron desde el punto de vista económico y ambiental la producción de etanol, octano, nonano, furfural e hidroximetilfurfural (HMF) a partir de bagazo de caña y zoca de café bajo el concepto de biorefinería. De la evaluación económica se obtuvieron costos de producción entre 0.38 – 0.91 USD/kg para el caso del furfural y entre 0.41 y 1.83 USD/kg para el caso del etanol. El objetivo de este trabajo es implementar un análisis termodinámico de la producción de furfural bajo el concepto de biorefinería utilizando bagazo de caña de azúcar como residuo lignocelulósico. La evaluación termodinámica está basada en el análisis exergético del proceso, el cual puede predecir el rendimiento termodinámico de un sistema energético y la eficiencia de los componentes de dicho sistema por medio de la cuantificación de la generación de entropía. Adicionalmente, se presentan los balances de materia en términos de la productividad de cada una de las plantas, y la evaluación económica de la obtención de furfural bajo el esquema de biorefinería.

2. Métodos

2.1 *Materia prima*

El bagazo de caña fue caracterizado con el fin de determinar el contenido de holocelulosa, celulosa, lignina, cenizas y extractivos. El contenido de holocelulosa fue determinado por medio del método de clorinación descrito en la norma ASTM D1104 (*Association for Testing Materials*, por sus siglas en inglés). El contenido de celulosa fue calculado después de la determinación de holocelulosa en búsqueda de la forma más pura de la fibra [6]. Finalmente, el contenido de hemicelulosa se obtuvo de la resta entre el contenido de holocelulosa y celulosa. El contenido de lignina se determinó por el método de adición de ácido sulfúrico concentrado descrito en la norma TAPPI T222 (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, por sus siglas en inglés). Etanol y agua fueron empleados como solventes para la determinación del contenido de extractivos utilizando la metodología reportada por la NREL/TP-510-42619 (*National Renewable Energy Laboratories*, por sus siglas en inglés). Finalmente, el contenido de cenizas se determinó por medio de la calcinación total del material siguiendo el procedimiento reportado en NREL/TP-510-42622.

La caracterización del bagazo de caña de azúcar fue utilizada como punto de partida en la simulación de una biorefinería para la producción de furfural, etanol, electricidad y vapor de agua.

2.2 Descripción del proceso

En la Figura 1 se presenta el diagrama de proceso integrado para el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica bajo el concepto de biorefinería. Inicialmente se requiere un proceso de lavado con el fin de retirar los componentes indeseables de la biomasa. A continuación, se llevan a cabo los procesos de secado, molienda y tamizado antes de la etapa de pretratamiento utilizando hidróxido de sodio. Después del pretratamiento, el licor hidrolizado (rico en pentosas y lignina soluble) se separa por filtración. Posteriormente, la fracción líquida se acidifica y la lignina soluble se precipita y recupera. El licor acidificado (rico en xilosa) es alimentado a una segunda planta donde se obtiene furfural por medio de un proceso de hidrólisis utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Además, la corriente proveniente de la planta de producción de furfural debe continuar a una etapa de purificación con el fin de recuperar el furfural como fue propuesto por [7].

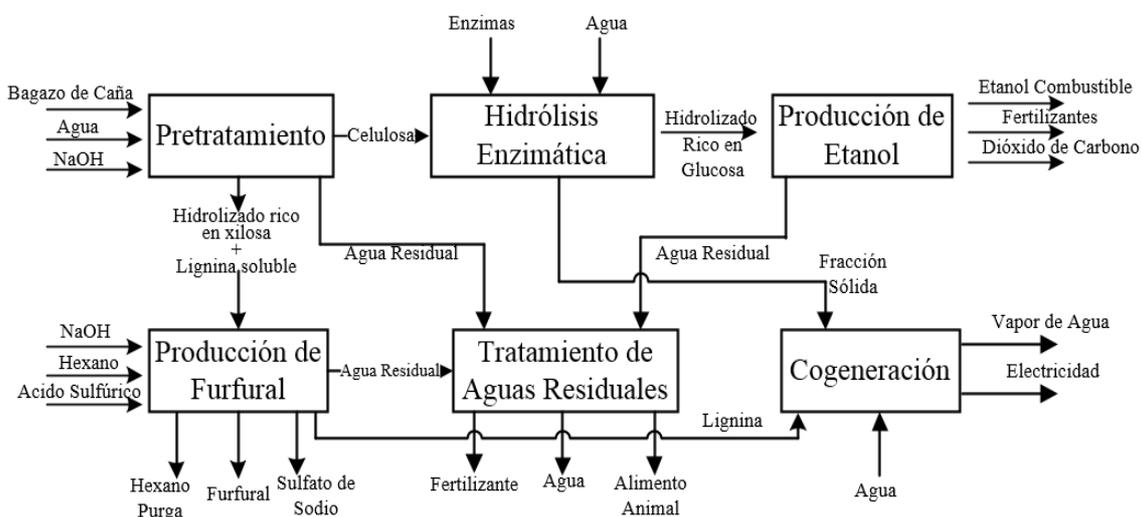


Figura 1. Esquema del diagrama de flujo de la producción de etanol y furfural bajo el concepto de biorefinería.

La fracción sólida (rica en celulosa) es alimentada a una tercera planta donde se realiza el proceso de sacarificación enzimática. La fracción líquida resultante (rica en hexosas) es utilizada como sustrato en el proceso de fermentación para producir etanol. Después de la fermentación, el bioetanol es recuperado por medio de esquemas de destilación y deshidratación usando tamices moleculares [8]. La corriente de vinaza se concentra y es utilizada como fertilizante. La fracción sólida remanente y la lignina recuperada del pretratamiento son utilizadas como combustible en el proceso de cogeneración para generar electricidad. La tecnología utilizada para el sistema de cogeneración es la BIGCC (*Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*) [9]. Por otra parte, la planta de tratamiento de aguas residuales es un proceso alternativo para recolectar aguas generadas en las diferentes plantas que integran la biorefinería. Este proceso consiste de una torre de enfriamiento para disminuir la temperatura del agua que va a ser depositada y una etapa de purificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas presentes en el agua [10]. Posteriormente, el agua purificada puede recircularse para cubrir la totalidad o al menos una parte de los requerimientos de agua en la biorefinería. La aproximación holística

adoptada para el diseño del proceso para la producción conjunta de etanol y furfural siguiendo el concepto de biorefinería multipropósito fue tomada de Moncada [2, 11].

2.3 Procedimiento de simulación

La síntesis del esquema de proceso se realizó utilizando herramientas computacionales. El objetivo de este procedimiento es generar balances de materia y energía donde se calcularon los requerimientos de materia prima, consumibles, utilidades y requerimientos energéticos adicionales. La herramienta computacional utilizada fue el paquete *Aspen Plus v8.2* (*Aspen Technology, Inc., USA*). El software especializado *Matlab®* (*MathWorks, USA*) fue utilizado para realizar cálculos matemáticos de las cinéticas empleadas para describir diferentes etapas del proceso. La etapa de hidrólisis alcalina se modeló utilizando los rendimientos reportados por Rabelo [12]. Para la hidrólisis enzimática se empleó la expresión cinética reportada por Morales-Rodriguez [13]. La producción de etanol se basó en las expresiones reportadas por Leksawasdi [14]. Y la producción de furfural se simuló empleando el procedimiento descrito por Agirrezabal-Tellería [15]. El modelo termodinámico NRTL (*Non-Random Two-Liquid*) fue utilizado para calcular los coeficientes de actividad de la fase líquida y la ecuación de estado *Hayden-O'Connell* para describir la fase vapor.

La evaluación económica se realizó utilizando el software *Aspen Plus Economic Analyzer* (*Aspen Technologies, Inc., USA*). Este análisis fue estimado en US dólares por un periodo de 10 años a una tasa de interés anual de 17%, considerando el método de depreciación de línea recta y un impuesto sobre la renta del 33% (en el contexto Colombiano). Los costos de materia prima, utilidades, salarios de operarios y supervisores, entre otros deben suministrarse al software con el fin de evaluar el costo de producción. Alguna de la información requerida por el software es presentada en la Tabla 1.

2.4 Análisis Energético

La cantidad de energía en términos de calor y/o electricidad requerida por el proceso puede calcularse a partir de las necesidades energéticas de cada una de las operaciones unitarias presentes en el esquema de proceso (Fig. 1). Adicionalmente, ya que se plantea un sistema de cogeneración con el fin de reducir los requerimientos energéticos del proceso, se utilizó el complemento computacional *Aspen Energy Analyzer* (*Aspen Technology, Inc., USA*) con el fin de evaluar la red de intercambio de calor y así determinar las necesidades energéticas del proceso en términos de utilidades como vapores de baja, media y alta presión, agua de enfriamiento, refrigerantes, entre otros.

2.5 Análisis exergético

La exergía está definida como la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de una corriente o un sistema; llevando dicho sistema a un estado de equilibrio con un ambiente de referencia. En un proceso ideal, la exergía se conserva pero en los procesos reales la cantidad total de exergía irreversible del proceso es destruida [19].

Tabla 1. Información de costos de materia prima, insumos, utilidades, entre otros requeridos para la evaluación económica.

Ítem	Unidades	Precio
Bagazo de Caña de Azúcar ^a	USD/Ton	15
Furfural ^b	USD/kg	0.9 – 1.7
Hidróxido de Sodio ^b	USD/Ton	320 - 400
Ácido Sulfúrico ^b	USD/kg	0.094
Hexano ^c	USD/Litro	0.30
Agua ^d	USD/m ³	0.74
Electricidad ^d	USD/kWh	0.14
Combustible ^e	USD/Megawatt	24.58
Operario ^d	USD/h	2.56
Supervisor ^d	USD/h	5.12

^a Tomado de [16], ^b Tomado de [17], ^c Tomado de ICIS Pricing [18], ^d Precios típicos en Colombia,

^e Tomado de [5].

La irreversibilidad de una operación unitaria se obtiene por medio de un balance global de la cantidad de exergía, como flujos de masa, calor y trabajo, que entran y salen del sistema como se puede observar en la ecuación 1.

$$I = \sum Ex_{j,in} - \sum Ex_{j,out} + \sum(\tau)Q_j - W_j \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\tau = 1 - \frac{T_o}{T_f} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde I corresponde a la irreversibilidad del sistema, Q es la transferencia de calor experimentada por el sistema y W el trabajo realizado. El cantidad adimensional (τ) se denomina “factor exergético de temperatura” y es la relación entre la temperatura del ambiente de referencia y el sistema. Ex_j representa la suma de la exergía química (Ex_j^{ch}) y física (Ex_j^{ph}) de los componentes involucrados en el proceso, la cual puede representarse como se muestra en las ecuación 3-5.

$$Ex_j = Ex_j^{ph} + Ex_j^{ch} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$Ex_j^{ch} = \Delta G_j^\circ + \sum n_j(Ex_{qj}^\circ) \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$Ex_j^{ph} = (h_j - h_o) - T_o(s_j - s_o) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde ΔG_j° es la energía libre de formación de Gibbs, n_j y Ex_q° representan el número de moles del elemento j en el componente y la exergía química de los elementos constituyentes, respectivamente (ecuación 4). Adicionalmente, h y S son la entalpía y entropía específica en un estado específico caracterizado por la temperatura T ; h_o y S_o denotan la entalpía y entropía, respectivamente, bajo condiciones normales con temperatura T_o (298 K) y presión de 1 atm (estado de referencia). La ecuación 4 está relacionado a la exergía química y la ecuación 5 a la exergía física.

La exergía química fue calculada utilizando el método de la energía libre de formación de Gibbs [20]. La exergía química estándar de un componente orgánico e inorgánico Ex_q° puede estimarse a partir de los valores de la energía de formación de Gibbs ΔG_j° de cada componente y las exergías químicas de los componentes constituyentes.

La eficiencia exergética se define como la irreversibilidad generada por la operación unitaria (I_c) dividido para la suma de las irreversibilidades de todas las unidades, como se representa en la ecuación 6.

$$ef = \frac{I_c}{I_{c,total}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

3. Resultados y discusión

3.1 Materia prima

La caracterización del bagazo de caña realizado a escala laboratorio se muestra en la Tabla 2. El bagazo de caña tiene un alto contenido de celulosa con potencial para la obtención de fracciones C6 (glucosa) como plataforma de otros productos como el etanol. La fracción de hemicelulosa puede utilizarse para producir fracciones C5 (xilosas) que van a servir como plataforma para la obtención de furfural. La lignina remanente es utilizada en los procesos de cogeneración para producir electricidad y vapor de agua.

Tabla 2. Caracterización química del bagazo de caña en base seca.

Componente	Porcentaje (%) ^a
Celulosa	46.7
Hemicelulosa	23.62
Lignina	19.71
Cenizas	1.13
Extractivos	8.79

^a Porcentajes en base seca.

3.2 Simulación del proceso

Los resultados de los balances de materia y energía del proceso de producción de furfural y etanol a partir de bagazo de caña de azúcar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidades de producción y rendimientos globales de los diferentes productos obtenidos en una biorefinería a partir de Bagazo de Caña.

Productos	Productividad ^a		Rendimientos	
	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Productos Primarios				
Etanol	121,358	Litros/día	126.41	L Etanol/ Ton Bagazo
Furfural	144.61	Ton/día	150.64	kg Furfural/Ton Bagazo
Electricidad	13.07	MW	1176.3	MJ/Ton Bagazo
Productos Secundarios				
Fertilizantes	116.3	Ton/día	121.15	Kg Fertilizante/ Ton Bagazo
Lignina	294.75	Ton/día	307.03	Kg Lignina/ Ton Bagazo
Cenizas	12.53	Ton/día	13.06	Kg Cenizas/ Ton Bagazo

^a Flujo de Materia Prima: 40 Ton/h de Bagazo de Caña de Azúcar.

El alto contenido de celulosa en el bagazo de caña permite obtener altos rendimientos de glucosa y por lo tanto altos rendimientos en la producción de etanol. Los rendimientos globales reportados para la conversión de materiales lignocelulósicos en azúcares son 0.71 gramos de xilosa por gramo de hemicelulosa y 0.64 gramos de glucosa por gramo

de celulosa. Los rendimientos reportados por [5] de etanol (199.3 L Etanol/Ton Bagazo) y de furfural (136.3 kg Furfural/Ton Bagazo) son semejantes a los resultados obtenidos en este trabajo. De los productos secundarios cabe resaltar el alto contenido de lignina remanente de las etapas de pretratamiento, la cual fue utilizada en el proceso para la producción de electricidad adicional.

3.3 Evaluación económica

Los resultados de la evaluación económica de la producción de furfural bajo el concepto de biorefinería utilizando parámetros en el contexto colombiano se muestran en la Tabla 4. Para el cálculo del costo de producción del furfural se tuvieron en cuenta los costos de la materia prima, de mano de obra, utilidades, cargos operacionales, costos administrativos y la depreciación del capital.

Como se puede observar los costos que tienen una mayor contribución en el costo final del furfural son el abastecimiento de la materia prima e insumos, los costos de utilidades y los costos administrativos. En la mayoría de los procesos industriales, los costos de materia prima representan un porcentaje superior al 50% del costo de producción [5]. Estos costos están relacionados con la recolección, pre-procesamiento, transporte y almacenamiento de la materia prima antes de ser utilizada en la biorefinería. Los costos de utilidades corresponden a los requerimientos de enfriamiento, calentamiento y energía eléctrica para el funcionamiento de las diferentes operaciones unitarias. En la Figura 2 se puede observar la distribución de los costos de producción de furfural utilizando bagazo de caña como materia prima bajo el concepto de una biorefinería.

Tabla 4. Costo de producción de furfural a partir de Bagazo de caña bajo el esquema de una biorefinería.

Parámetro	USD/Ton	Participación (%)
Costo de Materias Primas	380	50.43
Costo de Mano de Obra	1.40	0.19
Costo de Utilidades	200	26.54
Costo de Cargos Operacionales, Gastos Indirectos de la Planta y Costos de Mantenimiento	7.10	0.94
Costos Administrativos	130	17.25
Depreciación del Capital	35	4.64
Total	753.50	100
Margen Económico Individual (%)^a		5- 55%

^a Precio de venta del furfural varía entre 800 y 1700 USD/ton.

El costo de producción de furfural a partir de bagazo de caña en una biorefinería es de 753.50 USD/Ton. El precio de venta de furfural en el mercado internacional varía en el rango entre 800 – 1,700 USD/Ton [17]. Al comparar los costos de producción con el precio de venta se puede obtener el margen económico de la producción de furfural, en donde, este margen se encuentra en el rango de 5 – 55% debido a la fluctuación en el precio de mercado. En este sentido, la producción de furfural bajo el concepto de biorefinería tiene una alta viabilidad desde el punto de vista económico, adicionalmente, otros co-productos del proceso son obtenidos como es el caso del etanol, electricidad y fertilizantes, los cuales pueden incrementar el valor agregado de la biorefinería.

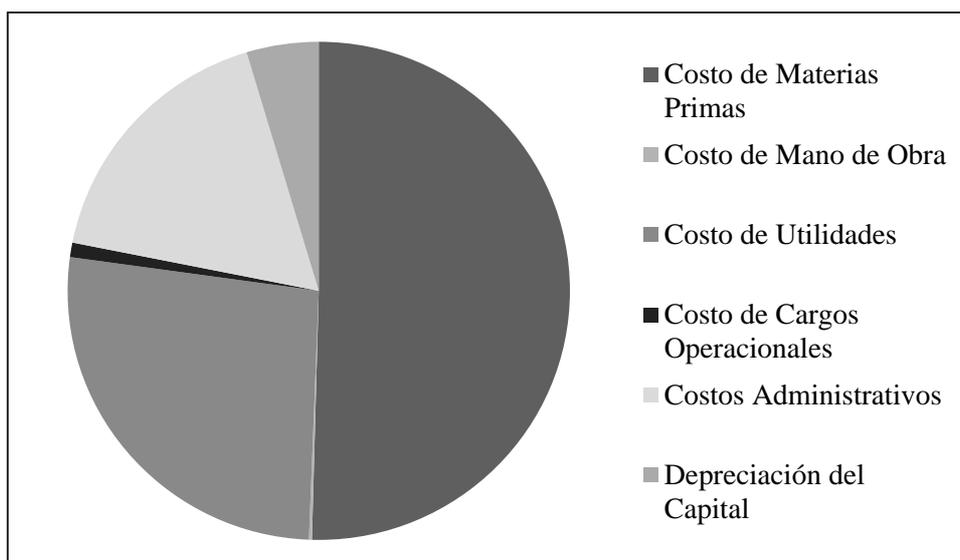


Figura 2. Distribución de costos de producción de furfural a partir de bagazo de caña.

3.4 Análisis energético

A partir de los balances de energía obtenidos de la simulación de la biorefinería, se determinó la demanda energética de cada una de las etapas o plantas de proceso involucradas en la biorefinería como se puede observar en la Tabla 5. Los mayores requerimientos energéticos se centran en las plantas de producción de furfural y etanol. Las condiciones de operación (130°C y 10 bares) del reactor en la planta de producción de furfural son las responsables de los altos requerimientos energéticos en esta planta. La etapa de separación (columnas de destilación) y purificación (equipo de tamices moleculares) para obtener etanol anhidro al 99% contribuyen a los altos consumos energéticos en esta planta. Como se puede apreciar en la Figura 3, las plantas de producción de etanol y furfural son los mayores sumideros de energía, seguidos por las plantas de pretratamiento e hidrólisis enzimática de la materia prima.

Tabla 5. Requerimientos energéticos de cada plataforma en el esquema de biorefinería.

Planta	Demanda Energética (GJ)
Pretratamiento	5.202
Hidrólisis Enzimática	6.238
Producción de Etanol	7.586
Tratamiento de Aguas Residuales	1.561
Producción de Furfural	8.649
Sistema de Cogeneración	1.368

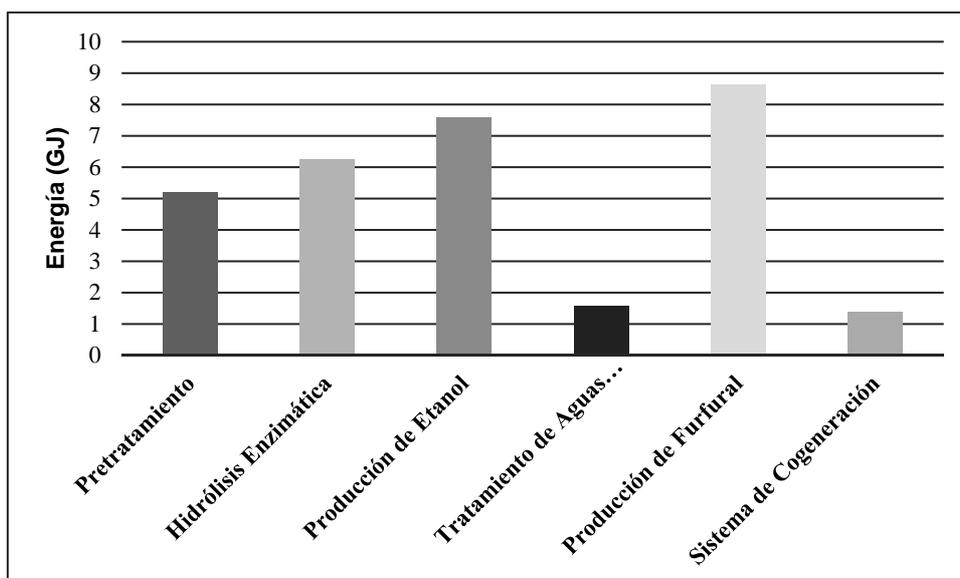


Figura 3. Distribución de los requerimientos energéticos de cada una de las plantas de la biorefinería.

3.5 Análisis exergético

El parámetro generalmente utilizado para evaluar el funcionamiento termodinámico de un sistema es la eficiencia térmica, definida en términos generales como la proporción entre la energía en la forma final deseada y la energía suministrada al sistema. Bajo esta definición, las cantidades de energía se comparan sin hacer referencia a la calidad de ésta. Sin embargo, manejando el concepto de exergía, la calidad de la energía puede compararse.

Con base en la primera ley de la termodinámica se obtuvieron los flujos de calor empleados o producidos por las unidades del proceso (tomados de la simulación), y utilizando las ecuaciones 1-6 se calculó su respectiva exergía como se especifica en la Tabla 6.

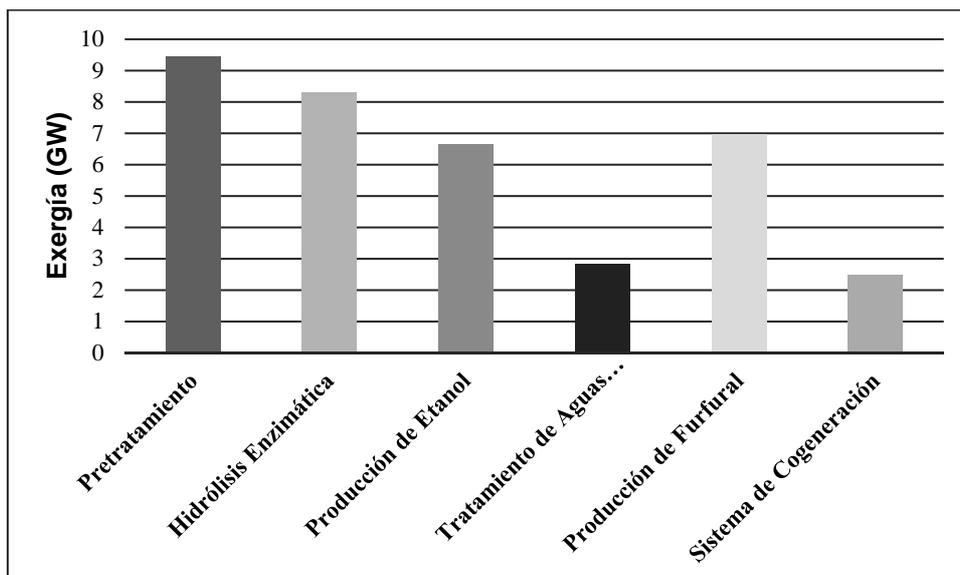


Figura 4. Distribución de la cantidad de exergía transferida al medio de referencia de cada una de las plantas en la biorefinería.

Tabla 6. Eficiencia exergética de cada una de las plantas en un esquema de biorefinería.

Planta	Transferencia de Exergía (GW)	Eficiencia Exergética (%)
Pretratamiento	9.439	25.738
Hidrólisis Enzimática	8.304	22.645
Producción de Etanol	6.648	18.13
Tratamiento de Aguas Residuales	2.823	7.699
Producción de Furfural	6.957	18.973
Sistema de Cogeneración	2.498	6.812

Como se puede apreciar en la Figura 4, las plantas que generan la mayor transferencia de exergía son los procesos de pretratamiento e hidrólisis enzimática de la materia prima, seguido por las plantas de producción de etanol y furfural. Este comportamiento es contrario a lo observado en la Figura 3 debido a las irreversibilidades del proceso, entendidas como la cantidad de exergía que por medio del procesamiento de la materia prima es destruida. La planta de pretratamiento es la sección de la biorefinería con la más alta transferencia de exergía debido a la transformación del bagazo de caña, que tiene un alto contenido energético, en otros productos con un contenido energético inferior. Este mismo comportamiento es observado para la hidrólisis enzimática, que es la planta con la segunda más alta transferencia de exergía. En comparación, las plantas de producción de etanol y furfural toman los azúcares fermentables para transformarlos en compuestos con un alto contenido energético.

4. Conclusiones

Se ha demostrado que tanto el análisis termodinámico energético como exergético pueden utilizarse como criterios de decisión para la selección de aquellos procesos que tienen una influencia directa en la eficiencia energética y en la rentabilidad económica de una biorefinería. Al implementar este análisis termodinámico en la producción de furfural y etanol a partir de bagazo de caña de azúcar bajo el concepto de biorefinería, se determinó que las etapas de proceso que generan las mayores limitaciones energéticas corresponden a los pretratamientos alcalinos y enzimáticos de la materia prima. Como se pudo observar en la evaluación económica de este proceso, los requerimientos energéticos, en términos de utilidades, son uno de los costos que tienen una mayor participación en el costo de producción de furfural. Por esta razón, con el fin de aumentar la rentabilidad económica y la eficiencia energética del proceso, debe evaluarse nuevos métodos de pretratamiento con menores requerimientos de calentamiento y enfriamiento, adicionalmente, se debería estudiar la posible integración energética de las corrientes internas del proceso.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales por la financiación para realizar este trabajo.

Referencias

- [1] S. I. Mussatto, J. Moncada, I. C. Roberto, and C. A. Cardona, «Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: the Brazilian case», *Bioresour. Technol.*, vol. 148, pp. 302–10, Nov. 2013.
- [2] J. Moncada, L. G. Matallana, and C. A. Cardona, «Selection of process pathways for biorefinery design using optimization tools: A colombian case for conversion of sugarcane bagasse to ethanol, poly-3-hydroxybutyrate (PHB), and energy», *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 11, pp. 4132-4145, 2013.
- [3] Information Handling Services (IHS. Inc), *Chemical Economics Handbook*, 2015.
- [4] J. K. Raman and E. Gnansounou, «Furfural production from empty fruit bunch – A biorefinery approach», *Ind. Crops Prod.*, vol. 69, pp. 371-377, Jul. 2015.
- [5] V. Aristizábal M, Á. Gómez P, and C. A. Cardona A, «Biorefineries based on coffee cut-stems and sugarcane bagasse: Furan-based compounds and alkanes as interesting products», *Bioresour. Technol.*, vol. 196, pp. 480-9, Nov. 2015.
- [6] J. S. Han and J. S. Rowell, «Chemical Composition of Fibers», *Paper and Composites from agro-based resources*, pp. 83-134, 1997.
- [7] E. Van der Heide and T. Zhang, «Method for producing furfural from lignocellulosic biomass material», 2010.
- [8] W. W. Pitt, G. L. Haag, and D. D. Lee, «Recovery of ethanol from fermentation broths using selective sorption-desorption», *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 25, no. 1, pp. 123-131, 1983.
- [9] I. I. Ahmed and A. K. Gupta, «Sugarcane bagasse gasification: Global reaction mechanism of syngas evolution», *Appl. Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 75-81, 2012.
- [10] R. Gerard, H. Hachisuka, and M. Hirose, «New membrane developments expanding the horizon for the application of reverse osmosis technology», *Desalination*, vol. 119, pp. 47-55, 1998.
- [11] J. Moncada, M. M. El-Halwagi, and C. a. Cardona, «Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case», *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 533-543, 2013.
- [12] S. C. Rabelo, N. A. Amezquita Fonseca, R. R. Andrade, R. Maciel Filho, and A. C. Costa, «Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide», *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 2600-2607, Jul. 2011.
- [13] R. Morales-Rodriguez, K. V. Gernaey, A. S. Meyer, and G. Sin, «A Mathematical model for simultaneous saccharification and co-fermentation (SSCF) of C6 and C5 sugars», *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 185-191, 2011.
- [14] N. Leksawasdi, E. L. Joachimsthal, and P. L. Rogers, «Mathematical modelling of ethanol production from glucose / xylose mixtures by recombinant *Zymomonas mobilis*», *Biotechnol. Lett.*, vol. 23, pp. 1087-1093, 2001.
- [15] I. Agirrezabal-Telleria, I. Gandarias, and P. L. Arias, «Production of furfural from pentosan-rich biomass: analysis of process parameters during simultaneous furfural stripping», *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 258-64, Sep. 2013.
- [16] J. A. Quintero, J. Moncada, and C. A. Cardona, «Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: A process simulation approach», *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 300-307, 2013.
- [17] ALIBABA, International Prices, 2015.
- [18] ICIS Pricing, International Chemical Prices, 2010.
- [19] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy. Energy, Environment And Sustainable Development*, Second Edi. Ontario, Canada, 2013.
- [20] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Elsevier, 1985.