

EVALUACIÓN AMBIENTAL E INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UNA PLANTA PARA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE ARROZ

Samir Isaac Merano Urtado: Ingeniero Químico, Magister Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cartagena, smeramoh@unicartagena.edu.co - ingmeramo_2008@hotmail.com

Recibido 03/03/2016 – Aceptado 08/15/2016

Resumen: En este trabajo se presenta una evaluación ambiental y de integración energética de una planta para producción de bioetanol a partir de residuos de arroz. Se simuló el proceso a partir de datos y reportes de condiciones de operación. Se utilizó el *software* de ingeniería de procesos ASPEN PLUS. Los datos de simulación permitieron realizar análisis *pinch* para determinar el potencial de integración energética de la planta. Se propuso una red de intercambiadores de calor para la reducción de suministro energético por servicios industriales para calentamiento y enfriamiento. Finalmente, se realizó un análisis ambiental del proceso integrado y el caso base, utilizando la herramienta WAR GUI, para determinar los PEI (potenciales impactos ambientales) del proceso y establecer una comparación entre el caso base y el integrado.

Palabras clave: Bioetanol, ASPEN PLUS, integración energética, análisis ambiental, WAR GUI.

Abstract: This paper presents an environmental assessment and energy integration of a plant for the production of bioethanol from rice residues. The process was simulated from data reports of operating conditions in the literature. ASPEN PLUS process engineering software was used. The simulation data allowed to develop pinch analysis to determine the energy integration potential of the plant. A network of heat exchangers was proposed for the reduction of energy supply by industrial services for heating and cooling. Finally, an environmental analysis of the integrated process and the base case were performed using the WAR GUI tool to determine the potential environmental impacts of the process and to establish a comparison between the integrated and non-integrated case.

Keywords: Bioethanol, ASPEN PLUS, energy integration, environmental analysis, WAR GUI.

1. Introducción

La demanda energética mundial ha incentivado la investigación científica encaminada a desarrollar métodos y tecnologías que complementen la producción de energía a partir de fuentes convencionales (USDA, 2008). Uno de los intentos por mitigar los impactos relacionados con este problema, es la producción de biocombustibles. La biomasa tiene un gran potencial energético y los procesos de transformación de ese tipo de sustancias a biocombustibles generan excelentes rendimientos económicos, debido principalmente a los bajos costos del material residual (Tomei y Helliwell, 2014). Una de las actividades más importantes en el departamento de Bolívar es la producción agrícola, para el 2008 en esta región se produjeron aproximadamente 125.520 toneladas de arroz, lo que representó, según la estimación de residuos del Atlas del

Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, una generación de 319.888 toneladas de residuo de este producto agrícola, material que puede ser utilizado en procesos de biorefinería para obtener biocombustibles, y reducir la generación de residuos sólidos por la actividad agroindustrial (Meramo, 2015).

La operación de la planta y los procesos propios para la producción de bioetanol, requieren de un gran suministro de energía, esto ocasiona que en muchos casos los costos de operación de la planta sean demasiado elevados (Sudiyani, Sembiring, Hendarsyah, y Alawiyah, 2010). Para mitigar el impacto a los recursos energéticos disponibles, existe una herramienta de la ingeniería de procesos enfocada a la reducción de necesidad de suministro de servicios industriales para calentamiento y enfriamiento, a través del análisis del

proceso, esta metodología se conoce como integración energética de procesos (Álvarez, Fortes, y Aguilar, 2007) e implica el cálculo del potencial de integración energética a través del análisis *pinch*, que permite conocer los requerimientos mínimos de servicios industriales en un proceso. Esta reducción se alcanza a través de una red de intercambiadores de calor (El-Halwagi, 2006).

Otro de los criterios utilizados en el análisis y diseño de procesos es la evaluación ambiental, por medio del cual se pueden determinar los potenciales impactos ambientales con base en criterios relacionados con la toxicidad humana, acuática, potencial de acidificación, entre otros, en los cuales las operaciones de biorefinería, sus materias primas y productos, afecten al ambiente por la descarga de alguna de estas sustancias (Carvajal, Gómez, y Cardona, 2016).

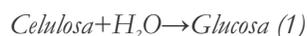
Por lo anterior en este trabajo se desarrolló una evaluación ambiental y de integración energética a una planta de producción de etanol a partir de residuos de arroz, con el fin de proponer una alternativa para sistemas de aprovechamiento de biomásas con base en criterios de sostenibilidad relacionados con la optimización de los recursos disponibles y la mitigación de impactos ambientales.

2. Procedimiento

2.1 Simulación de la planta

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica de las condiciones de operación de la planta para producción de bioetanol que sirvieron de base para la simulación de los casos. En la base de datos del software ASPEN PLUS no existen muchas de las sustancias implicadas en la operación de la planta, por tanto estas sustancias fueron creadas utilizando los datos del laboratorio de energía renovables que nos permitieron obtener datos de la simulación más aproximados a la realidad (Wooley y Putsche, 1996).

La planta simulada inicia con el proceso de pretratamiento químico de la biomasa, el cual permite la degradación de carbohidratos en azúcares fermentables de cinco y seis carbonos. La operación se lleva a cabo según Luo, van der Voet, y Huppés (2010) a 190 °C y 19 atm de presión en presencia de ácido sulfúrico diluido al 0.6% *w/w*. La operación continúa con enfriamiento y posterior neutralización, lo que permite estabilizar el pH, esta reacción se lleva a cabo adicionando hidróxido de calcio al sistema. La planta opera en condiciones SSCF (*Simultaneous saccharification and co-fermentation*), las reacciones del reactor de fermentación-sacarificación fueron tomadas de las reportadas por Wooley, Ruth, Sheehan, Majdeski y Galvez (1999), las ecuaciones 1, 2 y 3 muestran los compuestos implicados en ella.



En el reactor se produce etanol a baja concentración, con alto contenido de agua y sustancias no deseadas que deben ser separadas del proceso. La purificación de etanol se llevó a cabo

en un tren de purificación que implica la operación de una *Beer Column*, donde CO_2 es separado de la mezcla en el jugo de la fermentación. La corriente es enviada a una segunda torre de destilación, la cual purifica etanol hasta la concentración del azeótropo. Finalmente, se obtiene el producto a su máxima concentración de 99.7% *w/w* a través de tamices moleculares (Kang et al., 2014).

2.2 Integración energética

Utilizando los datos de la simulación, se realizó análisis *pinch* por el método algebraico, para determinar el potencial de integración energética de la planta. Esto permitió realizar la propuesta del diseño de la red de intercambiadores de calor para lograr los *targets* de ahorros de servicios industriales para calentamiento y enfriamiento, determinados a partir del *pinch* (El-Halwagi, 2012).

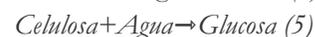
2.3 Análisis ambiental

Para el análisis ambiental, se utilizó el *Waste Reduction Algorithm* (WAR GUI), algoritmo desarrollado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, EPA. El programa utiliza los balances de materia y energía obtenidos de la simulación con ASPEN PLUS, para calcular los potenciales impactos que se generarían por la descarga aleatoria de las sustancias implicadas en un proceso. El *software* maneja ocho categorías de impacto; potencial de acidificación (AP), potencial de calentamiento global (GWP), potencial de degradación de ozono (ODP), potencial de oxidación fotoquímica (PCOP), toxicidad humana por ingestión (HTPI), toxicidad humada por inhalación o exposición dérmica (HTPE), potencial de toxicidad acuática (ATP) y potencial de toxicidad terrestre (TTP) (Hernández, Romero, Dávila, Castro, y Cardona, 2014). En forma de comparación, se realizó el análisis para el caso base y el caso integrado, lo que permitió determinar la alternativa que generaría menores impactos al ambiente de acuerdo a los criterios evaluados por el programa, junto a los balances de masa y energía de las simulaciones.

3. Resultados

3.1 Simulación del proceso

Se realizó la simulación con una base de cálculo de entrada de biomasa de 1795.8 t/año, con una concentración de mezcla de 0.5 % *w/w* en base húmeda. Las reacciones simuladas en el reactor de pretratamiento ácido fueron tomadas de las reportadas por Luo, van der Voet, y Huppés (2010) de acuerdo a las siguientes ecuaciones químicas:



Posterior al proceso de pretratamiento, la corriente es enviada a un reactor de neutralización donde se precipita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*gypsum*), el cual, junto a la lignina, son separados del proceso. La figura 1, ilustra la simulación de la planta.

La reacción de fermentación se llevó a cabo en operación SSCF, mostrando rendimientos altos en producción de bioetanol en este tipo de procesos, la tabla 1 muestra una descripción de las corrientes principales de la planta. El etanol sale del reactor de fermentación a una concentración baja, de aproximadamente

del 6 % w/w. La corriente fue enviada al tren de purificación, donde en una torre de absorción, se extrae el dióxido de carbono presente en la corriente de proceso. El tren sigue con una destilación hasta llevar al etanol a su punto azeotrópico con el agua.

Figura 1
Simulación de la planta SSCF Etanol

MIX 1: Unidad de mezcla 1, COMPPRET: Unidad de compresión 1, HENS1: Intercambiador de calor 1, PRETRATA: reactor de pretratamiento, HENS2: Intercambiador de calor 2, NEUTRALI: Reactor de neutralización, DESLIGNI: Unidad separación de lignina y gypsum, FLASH1: Unidad separación flash, HENS3: Intercambiador de calor 3, IONEXCHA: Unidad de intercambio iónico, HENS4: Intercambiador de calor 4, MIX2: Unidad Mezcla 2, SSCF: Reactor de sacarificación y cofermentación, B3: Unidad de separación, HENS7: Intercambiador de calor 7, BEERC: Unidad destilación 1, DESA2: Unidad de destilación 2, HENS5: Intercambiador de calor 5, COMPRES: Unidad de compresión 2, TAMIZ: Unidad de tamices moleculares, HENS6: Intercambiador de calor 6

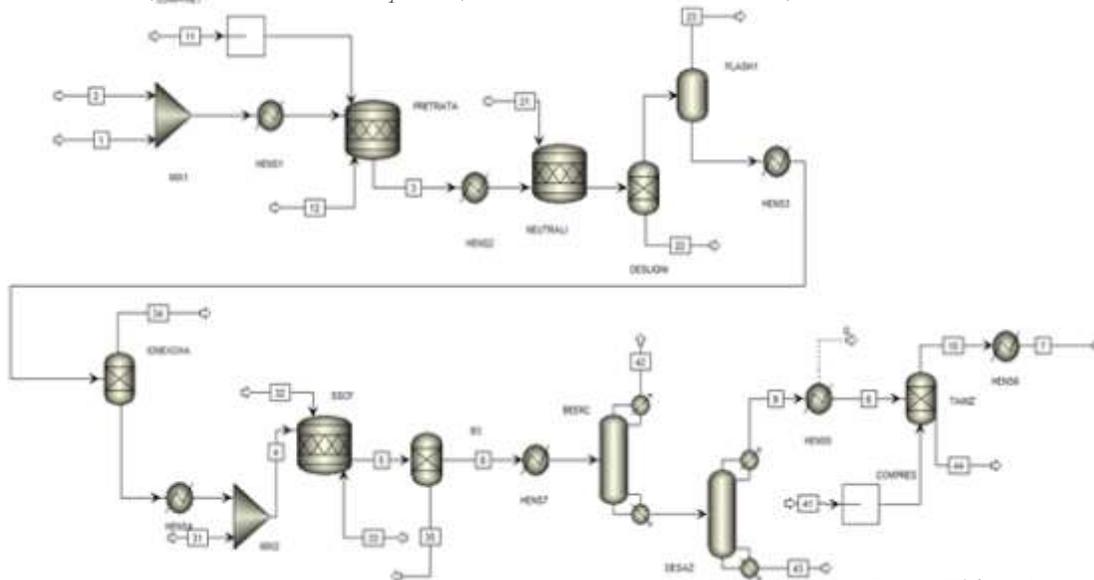


Tabla 1
Descripción de las corrientes principales

Fuente: Elaboración propia

Corriente	1	3	4	5	6	7
Flujo másico (kg/h)	205	665.61	537.508	547.508	32.5	30.7
Temperatura (K)	298.15	463.15	303.15	298.15	333.15	298.15
Presión (atm)	1	13	1	1	1	1
<i>Fracciones másicas de los componentes</i>						
Agua	0.5	0.8357	0.853	0.8315	0.056	0.03
Lignina	0.0975	0.03568	0	0	0	0
Celulosa	0.1561	0.05588	0.0004	0.01358	0	0
Hemicelulosa	0.1365	0.0026	0.000023	0.0032	0	0
Xilosa	0	0.05377	0.0666	0.0098	0	0
Etanol	0	0	0	0.06	0.944	0.997
CO ₂	0	0	0	0.0568	0	0
Glucosa	0	0.00578	0.055	0.0052	0	0
Furfural	0	0.0021	0.000047	0.00004	0	0
H ₂ SO ₄	0	0.0009	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

De la destilación azeotrópica se obtuvo etanol en una pureza de 94.44 % w/w, Uragami, Saito, y Miyata (2015) reportan que la concentración de azeótropo de la mezcla etanol-agua es 96.5 % w/w, en la simulación del proceso el azeótropo se formó a una concentración menor por la presencia de varias sustancias producidas por la fermentación, lo que afecta el equilibrio líquido-líquido del sistema. Finalmente, el etanol es purificado hasta una concentración de 99.7 % w/w por medio de tamices moleculares.

3.2 Integración energética

Para el análisis *pinch*, se tuvieron en cuenta las corrientes implicadas en la transferencia de calor en intercambiadores en estado líquido o gas. La tabla 2, muestra las corrientes frías y calientes seleccionadas del proceso para la integración energética.

Tabla 2

Corrientes Frías y Calientes

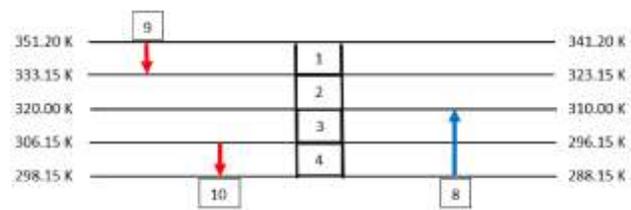
Corriente	Ts(K)	Tt(K)	FCp(kJ/(h K))	H(kJ/h)
8	298.15	320	2006.09	43833.28
9	351.32	333.15	56.034	-1000.27
10	306.15	298.15	91.49	-740.82

Fuente: Elaboración propia

La figura 2 nos muestra el diagrama de intervalos para las corrientes frías y calientes seleccionadas.

Figura 2

Diagrama de intervalos de las corrientes térmicas del proceso



Fuente: Elaboración propia

A partir del diagrama de la figura 2, se determina el aporte calórico de cada intervalo por parte de las corrientes frías y calientes del proceso. La tabla 3 muestra los aportes de calor por enfriamiento y calentamiento para cada intervalo.

Tabla 3

Aportes de calor para cada intervalo

Intervalo	Q Calientes (MJ/h)	Q Frías (MJ/h)
1	1.00027	0
2	0	0
3	0	27.427
4	0.7408	16.4057

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la tabla 3 permitieron establecer restricciones del modelo para determinar el punto *pinch* y los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento. Las restricciones obtenidas, se solucionaron a través de programación matemática en el *software* LINGO 14.0 y fueron las siguientes:

$$r1 - Q_{bmin} = 1.00027;$$

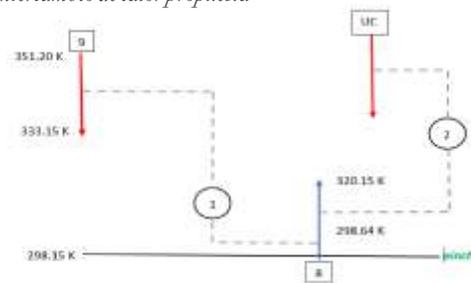
muestra los aportes de calor por enfriamiento y calentamiento para cada intervalo.

$$\begin{aligned} r2 - r1 &= 0; \\ r3 - r2 &= -27.427; \\ -r3 + Q_{emin} &= 0.7408 - 16.4057; \\ Q_{bmin} &> 0; \\ Q_{emin} &> 0; \\ r1 &> 0; \\ r2 &> 0; \\ r3 &> 0; \end{aligned}$$

La solución del modelo nos muestra que los requerimientos mínimos fueron 43.10 MJ/h y 0 MJ/h , para calentamiento y enfriamiento, respectivamente. El punto *pinch* se ubicó a la temperatura de 298.15 K para la escala caliente.

Figura 3

Red de intercambio de calor propuesta



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Requerimientos de servicios industriales del proceso

Parámetro	Calentamiento (MJ/h)	Enfriamiento (MJ/h)
Requerimientos energéticos del proceso	43.833	1.740
Mínimos requerimientos	43.092	0
Máximo porcentaje de ahorro	1.69 %	100 %
Requerimientos proceso integrado	43.150	0.74082
Porcentaje de ahorro	1.55 %	57.42 %

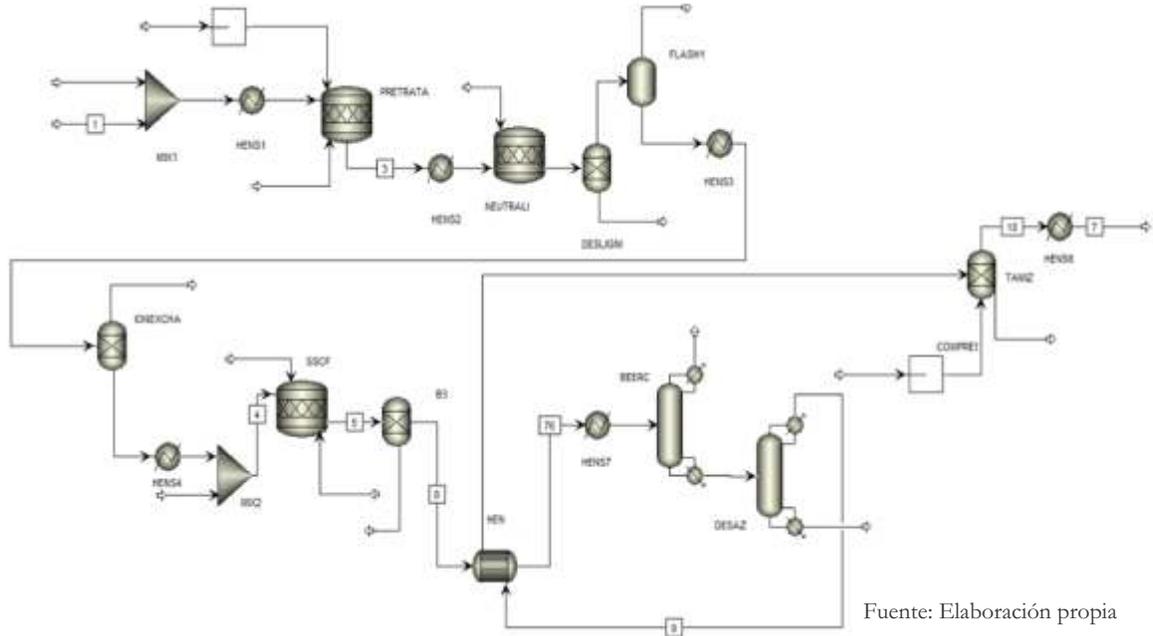
Fuente: Elaboración propia

La tabla 4 muestra los requerimientos energéticos del proceso, los mínimos y los alcanzados luego de la integración energética. Se observa que para el caso sin integrar la cantidad de servicio industrial de calentamiento es significativamente mayor en comparación a la de enfriamiento. La integración energética del proceso no reflejó gran ahorro en los servicios de calentamiento, caso contrario al enfriamiento, donde se logra una reducción por encima del 50%.

Figura 4

Planta caso integrado

MIX1: Unidad de mezcla 1, COMPPRET: Unidad de compresión 1, HENS1: Intercambiador de calor 1, PRETRATA: reactor de pretratamiento, HENS2: Intercambiador de calor 2, NEUTRALI: Reactor de neutralización, DESLIGNI: Unidad separación de lignina y gypsum, FLASH1: Unidad separación flash, HENS3: Intercambiador de calor 3, IONEXCHA: Unidad de intercambio iónico, HENS4: Intercambiador de calor 4, MIX2: Unidad Mezcla 2, SSCF: Reactor de sacarificación y cofermentación, B3: Unidad de separación, HENS7: Intercambiador de calor 7, BEERC: Unidad destilación 1, DESA2: Unidad de destilación 2, HENS5: Intercambiador de calor 5, COMPRES: Unidad de compresión 2, TAMIZ: Unidad de tamices moleculares, HENS6: Intercambiador de calor 6.



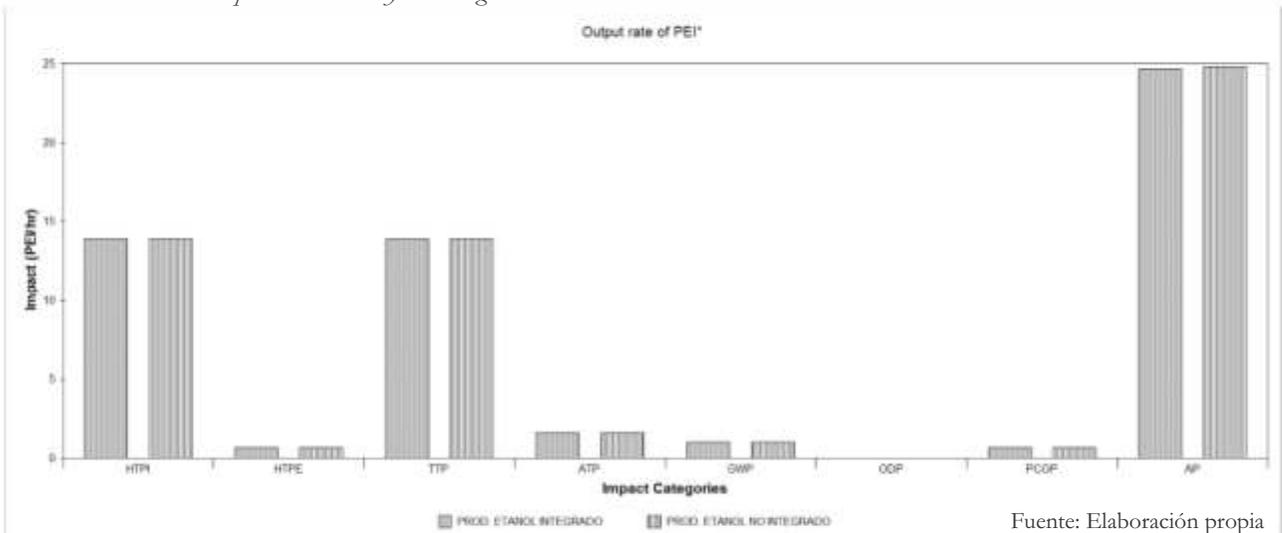
3.3 Análisis ambiental

Se desarrolló el análisis a partir de los datos obtenidos, flujos de materia y energía, de las simulaciones de los casos base e integrado, los cuales fueron utilizados en el software WAR GUI. La evaluación se realizó con base en la comparación de los potenciales impactos ambientales para los escenarios de estudio. La Figura 5, muestra los resultados del análisis para cada impacto por caso de estudio. La generación de PEI para los

casos evaluados fueron similares, se obtuvo para el escenario base 45.5 PEI/h, mientras que para el diseño integrado 43.8 PEI/h. Este resultado fue esperado debido a que la diferencia entre un diseño y otro, va relacionada a la integración energética, logrando ahorros de servicios industriales, lo que se traduce en una reducción en el aspecto de potencial de acidificación (AP), ya que el programa evalúa los efectos de consumo o suministro de energía de acuerdo al balance energético de la simulación.

Figura 5

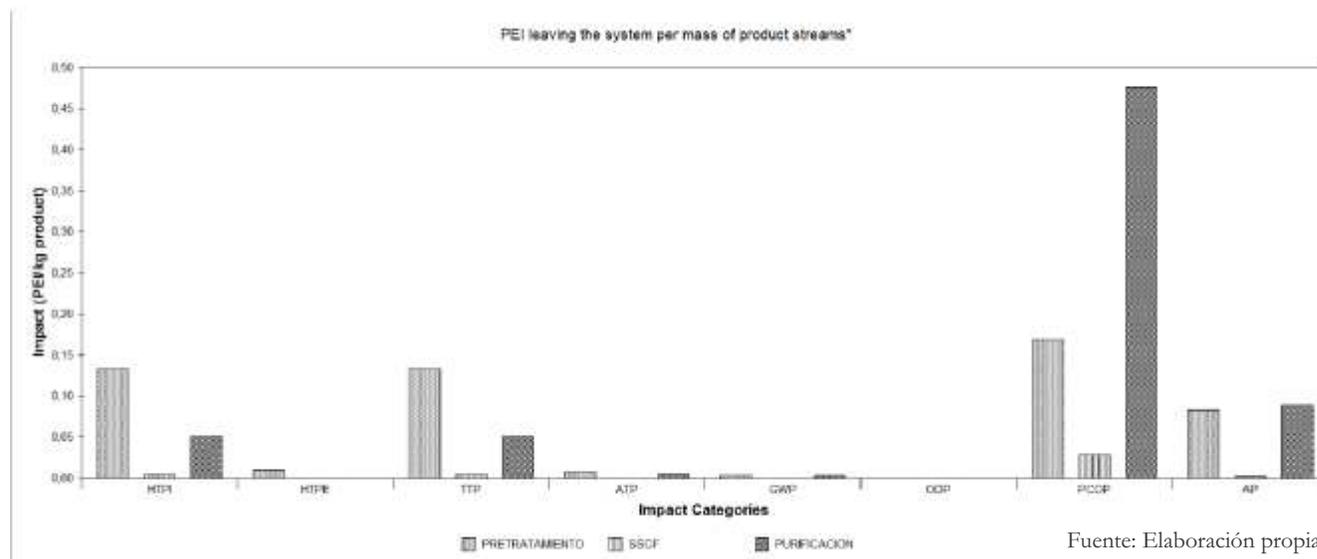
Análisis ambiental de PEI para el caso base y caso integrado



La evaluación también se realizó para cada subproceso de la planta en el diseño integrado. La figura 6 muestra los resultados de impactos potenciales para el pretratamiento ácido, fermentación y purificación. Los resultados mostraron que, para el criterio de toxicidad humana por ingestión, la etapa de pretratamiento fue la que más impactó, debido a la presencia de

sustancias como ácido sulfúrico o furfural. Por otra parte, en el aspecto relacionado a los límites de exposición, la operación de la planta no implica mayores riesgos para este aspecto, lo que traduce que el recurso humano encargado de la operación de la planta no estaría en inminente peligro por exposición por la eventual descarga de los químicos implicados en el proceso.

Figura 6
Análisis ambiental de PEI para cada etapa del proceso para el caso integrado



El potencial de toxicidad terrestre (TTP) se ve afectado principalmente por las etapas de pretratamiento y purificación, con una generación de 0.14 y 0.6 PEI/kg de producto, respectivamente. Esto refleja la importancia a la hora del diseño y operación de la planta, tener en cuenta los posibles impactos sobre el suelo por los químicos empleados en esas etapas del proceso. Finalmente, el potencial de oxidación fotoquímica (PCOP) fue el aspecto más impactado por la operación de la planta, con una generación para el diseño integrado de 0.72 PEI/kg de producto, donde la etapa de purificación es la que resultó con mayor generación de potenciales impactos, con 0.48 PEI/kg de producto, criterio relacionado a los efectos sobre la salud debido a enfermedades asociadas por la contaminación atmosférica por la presencia de sustancias orgánicas como etano, etileno, formaldehído, entre otras, suspendidas en el aire (Ruiz, Smith, y Gonzalez, 2012).

4. Conclusiones

En este estudio se simuló y analizó una planta de producción de etanol a partir de residuos de arroz. Los resultados mostraron que para las operaciones y orientación del proceso se producen 0.149 kg de etanol por cada kg de biomasa (residuos de arroz) que entra a la planta, lo que representa la generación de productos de valor agregado y muestra que, a partir de desechos sólidos con bajo valor de mercado, se pueden obtener biocombustibles.

Adicionalmente, el análisis *pinch* y la integración energética aplicada a la planta nos permitió conocer el potencial ahorro de servicios industriales de calentamiento y enfriamiento, logrando reducciones de 1.55% y 57.42%, respectivamente, por lo que se logra optimizar los recursos disponibles. El análisis ambiental reflejó que la etapa de pretratamiento es la que más afecta la toxicidad humana por ingestión y el potencial de toxicidad terrestre, esto se debe a la presencia de sustancias con dosis letal baja, lo que debe ser tenido en cuenta durante la etapa de diseño conceptual y comisionado de la planta. En cuanto a los límites de exposición, el análisis indica que la planta no presenta grandes peligros en este aspecto, lo que facilita el diseño de sistemas de contingencia y seguridad industrial.

Referencias

- Álvarez, X. B., Fortes, M. C., & Aguilar, R. A. (2007). Diseño de una red de intercambio de calor utilizando la metodología supertargeting del punto de pliegue, 7, 2340.
- Carvajal, J. C., Gómez, Á., & Cardona, C. A. (2016). Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. *Bioresource Technology*, 214, 468476. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.103>
- El-Halwagi, M. M. (2006). *Process Integration* (Vol. 7). [https://doi.org/10.1016/S1874-5970\(06\)80001-9](https://doi.org/10.1016/S1874-5970(06)80001-9)
- El-Halwagi, M. M. (2012). *Sustainable Design Through*

- Process Integration: Fundamentals and Applications to Industrial Pollution Prevention, Resource Conservation, and Profitability Enhancement. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-744-3.00001-1>
- Hernández, V., Romero-García, J. M., Dávila, J. A., Castro, E., & Cardona, C. A. (2014). Techno-economic and environmental assessment of an olive stone based biorefinery. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 145150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.008>
- Kang, Q., Huybrechts, J., Van Der Bruggen, B., Baeyens, J., Tan, T., & Dewil, R. (2014). Hydrophilic membranes to replace molecular sieves in dewatering the bio-ethanol/water azeotropic mixture. *Separation and Purification Technology*, 136, 144149. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.009>
- Luo, L., van der Voet, E., & Huppes, G. (2010). Biorefining of lignocellulosic feedstock - Technical, economic and environmental considerations. *Bioresource Technology*, 101(13), 50235032. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.109>
- Meramo, S. (2015). Diseño Conceptual e Integración energética de una biorrefinería a partir de residuos de maíz. Universidad de Cartagena.
- Ruiz-Mercado, G. J., Smith, R. L., & Gonzalez, M. A. (2012). Sustainability Indicators for Chemical Processes: II. Data Needs. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(5), 23292353. <https://doi.org/10.1021/ic200755k>
- Sudiyani, Y., Sembiring, K. C., Hendarsyah, H., & Alawiyah, S. (2010). Alkaline pretreatment and enzymatic saccharification of oil palm empty fruit bunch fiber for ethanol production. *Menara Perkebunan*, 78(2), 7074.
- Tomei, J., & Helliwell, R. (2014). Food versus fuel? Going beyond biofuels. *Land Use Policy*, 56, 320326. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.015>
- USDA. (2008). U . S . Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. *Energy Policy*, 74(February), 309324. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=11694763
- Wooley, R. J., & Putsche, V. (1996). Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components. *Victoria*, (April), 138.
- Wooley, R., Ruth, M., Sheehan, J., Majdeski, H., & Galvez, A. (1999). Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current D. *Contract*, (July), 132. <https://doi.org/NREL/TP-510-32438>