

DISEÑO CONCEPTUAL Y OPTIMIZACIÓN DE UNA BIORREFINERÍA DE POSOS DE CAFÉ

CONCEPTUAL DESIGN AND OPTIMIZATION OF A COFFEE GROUNDS BIOREFINERY

José Daniel Rojas-Dorantes^a, Jorge Arturo Romero-Bustamante^b, Víctor M. Rivera^a y Eliseo Hernández-Martínez^{a*}

^a Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, región Xalapa, Veracruz, México

^b Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Cd. De México, México

*elisehernandez@uv.mx

Received September 30, 2022; Revised: November 08, 2022; Accepted: November 16, 2022

Resumen

La infusión del grano tostado de café es una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial, sin embargo, tras su preparación se generan cantidades importantes de residuos sólidos llamados posos de café. Estos residuos presentan alto contenido de componentes orgánicos de valor agregado, por lo que es un candidato para la obtención de nuevos productos. De hecho, en la literatura se han reportado estudios orientados al desarrollo del tren de procesos que permitan su aprovechamiento. No obstante, a la fecha existen pocos trabajos enfocados en el aprovechamiento de estos residuos mediante el diseño de una biorrefinería, debido a los altos costos y tiempo que esto implica. Si bien, se han reportado avances en términos del modelado y la simulación, la incorporación de procesos biológicos a los simuladores de procesos presenta limitaciones. Lo anterior limita el estudio de la biorrefinería en términos de condiciones de operación, rendimientos o costo-beneficio. En ese sentido, en este trabajo se propone el diseño conceptual de una biorrefinería para el aprovechamiento de los posos de café, considerando la producción de ácidos carboxílicos (fórmico y acético), compuestos aromáticos (vainillina, guaiacol y acetovanilona) así como biobutanol y acetona. La propuesta se basa en el uso del software Aspen Plus acoplado a subrutinas en Fortran para la simulación de los procesos biológicos. Mediante un análisis de sensibilidad se logra determinar condiciones operativas para maximizar el rendimiento global del proceso. Los resultados muestran que se pueden obtener productos con purezas mayores al 95%.

Palabras clave: Optimización, biorrefinería, posos de café, Aspen Plus.

Abstract

The infusion of roasted coffee beans is one of the most consumed drinks worldwide; however, after its preparation, significant amounts of solid residues called coffee grounds are generated. These residues present a high content of organic components of value added, making it a candidate for obtaining new products. In fact, the literature has reported some studies oriented to the development of a process train that allows its utilization. However, currently there are few studies focused on the utilization of these wastes through a biorefinery design, due to the excessive costs and time involved. Progress in terms of modeling and simulation has been reported, although the inclusion of biological processes in process simulators has limitations. This restricts the study of biorefinery in terms of operating conditions, yields or cost-benefit. In this sense, this work proposes the conceptual design of a biorefinery for the use of coffee grounds, considering the production of carboxylic acids (formic and acetic), aromatic compounds (vanillin, guaiacol and acetovanilone) as well as biobutanol and acetone. The proposal is based on Aspen Plus software coupled to Fortran subroutines for the simulation of biological processes. Through a sensitivity analysis it

is possible to determine operating conditions to maximize the overall performance of the process. The results show that products with purities higher than 95% can be obtained.

Keywords: Optimization, biorefinery, coffee grounds, Aspen Plus.

Introducción

Actualmente, el café es una de las bebidas más consumidas mundialmente, teniendo una producción anual de 10.176 MMkg de grano de café. De acuerdo con la International Coffee Organization (2020), México es el noveno productor mundial de café, generando 240 Mkg al año. La bebida se prepara a partir de la infusión del grano del café tostado, lo que genera un residuo sólido denominado posos de café. Estos residuos representan entre 40- 45% del grano tostado y contienen gran cantidad de componentes como antioxidantes, carbohidratos y lípidos, que terminan siendo desaprovechados. Aunque existen diversas alternativas para su utilización tales como alimento para rumiantes, composta o pellets de combustible, los posos no se aprovechan por completo (Atabani, et al., 2019). Por ello, se han estudiado procesos para generar productos de alto valor agregado. Por ejemplo, Al- Hamamre et al. (2012) estudiaron la transesterificación de los posos de café para la obtención de biodiésel. De igual manera, Panusa et al. (2013) llevaron a cabo la extracción de antioxidantes de los posos de café. Mientras que Jung et al. (2016) fabricaron carbón activado útil como absorbente del ácido naranja 7 y de azul de metileno a partir de los posos de café.

A pesar de que, los trabajos previos reportan resultados positivos sobre el aprovechamiento de este residuo, se debe considerar que los componentes presentes en los posos de café solo se aprovechan parcialmente. Una propuesta que ha demostrado ser atractiva para el aprovechamiento global de componentes en residuos agroindustriales es mediante el planteamiento de biorrefinerías. No obstante, su implementación no es tan sencilla comparada con las industrias tradicionales, debido a factores como las condiciones específicas de los microorganismos que conducen los diferentes bioprocesos. Una estrategia para su estudio es mediante el modelado y la simulación de la biorrefinería, sin embargo, esta tarea resulta compleja, pues los simuladores comerciales disponen limitadamente de librerías enfocadas a los bioprocesos (Darkwah et al., 2018). Entre las propuestas de biorrefinería reportadas, se encuentra la de Nitzsche et al. (2016), que llevaron a cabo el diseño técnico y la evaluación económica de una biorrefinería de madera utilizando Aspen Plus. En ella se produjeron etileno, lignina organosolv y combustible, con una eficiencia energética total de

87.1%. Sin embargo, el análisis económico mostró que no era viable económicamente.

Respecto a los posos de café, Mata et al. (2018) realizaron un estudio donde describieron y compararon propuestas conceptuales para una biorrefinería. Enfocándose únicamente en un solo producto de valor agregado, concluyeron que la propuesta tenía un alcance limitado, sugiriendo que deben incluirse un mayor número de bioprocesos para que fuera la biorrefinería sea rentable. Con la finalidad de acoplar simulaciones de procesos biológicos a Aspen, Darkwah et al. (2018) realizaron una simulación de una fermentación para el sistema acetona-butanol-etanol. Para describir de manera adecuada las reacciones biológicas emplearon una subrutina en Fortran. Lo anterior permitió realizar simulaciones bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos demostraron un correcto acoplamiento entre los softwares, dando paso a una posterior implementación en trenes de procesos para una planta. Recientemente, Yeoh y Ng (2022) hicieron un estudio para 2 configuraciones de biorrefinerías de posos de café utilizando Aspen Plus. A pesar de que los resultados demostraron el potencial de la biorrefinería, para la simulación se emplearon reacciones de conversión para describir las cinéticas biológicas, lo cual es una limitante en la evaluación de las interacciones biológicas, tales como la cinética de crecimiento de los microorganismos, la inhibición por sustratos y/o productos, periodos de adaptación, entre otros.

En ese sentido, en este trabajo se presenta una propuesta de diseño conceptual para la biorrefinería de posos de café considerando la generación de distintos productos de valor agregado. La simulación de la planta se realizó en Aspen Plus versión v12 con servidor de licencia 148.206.162.9, acoplado a subrutinas programadas en Fortran para la evaluación de los bioprocesos. Se realizó un análisis de sensibilidad de las operaciones unitarias determinando las condiciones que maximizan el rendimiento de la planta.

Metodología

Composición de los posos de café

La biomasa cuenta con una composición variable, por lo que en la literatura se encuentran reportadas distintas composiciones. En la Tabla 1 se muestra la

composición de los posos de café considerados para la evaluación de la biorrefinería y los compuestos utilizados para la simulación (Yeoh y Ng, 2022). Para considerar la variación en la composición de los posos de café, se emplearon valores de composición por 100g de material seco de celulosa (13.19 y 11.61), y lignina (25.6 y 22.2), los cuales fueron reportados por Ballesteros et al. (2014). Como base de cálculo se consideró lo reportado en Yeoh y Ng (2022) para una cantidad de posos de café producidos en una planta en operación, 5767 kg/h de posos de café húmedos, de los cuales 3806.2 kg/h representan el contenido de agua.

Tabla 1. Composición de los posos de café

Componentes químicos	Composición por 100g de material seco	Componente introducido en Aspen Plus	Referencia
Celulosa	10.95	Celulosa	Yeoh y Ng (2022)
Hemicelulosa	31.83	Celulosa	Yeoh y Ng (2022)
Lignina	27.00	2-metoxi-4-propilfenol	Abdelaziz et al. (2020)
Triglicéridos	11.35	Trioleína	Yeoh y Ng (2022)
Ácidos grasos	3.65	Ácido oleico	Yeoh y Ng (2022)
Ceniza	2.00	Óxido de calcio	Yeoh y Ng (2022)
Proteína	10.70	Ácido glutámico	Yeoh y Ng (2022)

Diseño conceptual de la biorrefinería

Teniendo en cuenta que se deben de generar varios productos de valor agregado para que la biorrefinería sea factible económicamente, se propusieron los siguientes factores para determinar los procesos unitarios que tendrá la biorrefinería:

1. Valor del producto de valor agregado.
2. Generación de diversos productos en el mismo proceso.
3. Utilización de la mayor parte de la composición de la biomasa.
4. Pretratamientos requeridos.

Considerando estos 4 factores, se buscó en la literatura sobre los procesos y el precio de los productos generados a partir de los posos de café. En la Tabla 2 se observa que la despolimerización oxidativa genera la mayor variedad de productos de valor agregado. Este proceso emplea la lignina de la biomasa. Por otro lado, la transesterificación utiliza los ácidos grasos libres para la producción de

biodiésel y tiene un costo unitario mayor a un dólar, mientras que la fermentación ABE utiliza la glucosa y permite generar acetona, butanol y etanol que tienen un costo unitario mayor a \$0.6. Por otro lado, se debe considerar que la biomasa requiere de un pretratamiento para separar la lignina de la biomasa, así como una hidrólisis para obtener glucosa a partir de la celulosa, se propuso un proceso Organosolv seguido por una separadora centrífuga.

Posteriormente, se separa la lignina de la corriente líquida y entra a una transesterificación. Por su parte, la lignina pasa por una despolimerización oxidativa, mientras que la corriente sólida por una hidrólisis enzimática y luego por una fermentación ABE. El tren de procesos propuesto se puede visualizar en la Figura 1.

Tabla 2. Procesos y precios reportados para el aprovechamiento de posos de café

Proceso	Productos generados	Valor (dólar/kg)	Referencia
Hidrólisis enzimática	Glucosa	-	-
Organosolv	Separación de lignina de la biomasa	-	-
Transesterificación	Biodiesel	\$1.10	Yeoh y Ng (2022)
Despolimerización oxidativa	Guaiacol	\$16.62	Yeoh y Ng (2022)
	Vainillina	\$12.46	
	Acetovanilona	\$49.86	
	Ácido acético	\$0.42	
	Ácido fórmico	\$0.83	
Fermentación ABE	Acetona	\$0.61	Alibaba (2022a)
	Butanol	\$0.88	Alibaba (2022b)
	Etanol	\$0.60	Alibaba (2022c)
Digestión anaerobia	Biogás	\$0.204	Irena (2017)

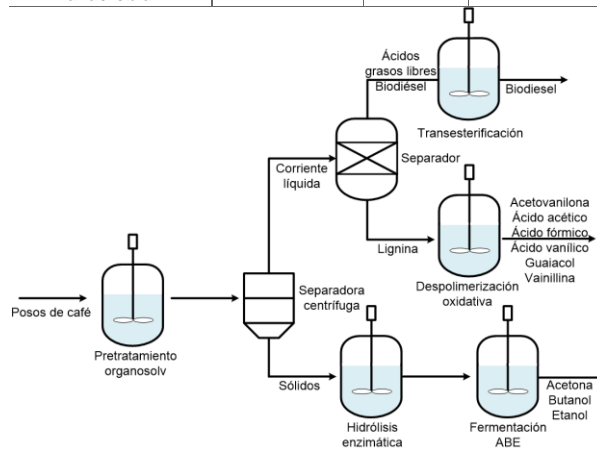


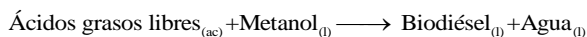
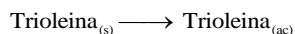
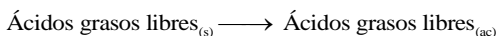
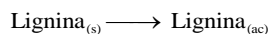
Figura 1. Tren de procesos unitarios más importantes y requeridos en la biorrefinería

Simulación en Aspen Plus

Para realizar la simulación en Aspen Plus se empleó el modelo termodinámico Cubic Plus Association (CPA), pues se utiliza para una variedad de equilibrios de fase complejos que incluyen mezclas de alcoholes, glicoles, ácidos orgánicos, agua e hidrocarburos (Kontogeorgis et al., 2007).

Pretratamiento

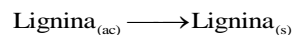
El pretratamiento Organosolv se propone de acuerdo con los datos reportados por Lee et al. (2019), donde hay una separación de 55.5% de lignina y una conversión de 62.4% de los ácidos grasos libres a biodiésel al agregar ácido sulfúrico al 3.6% y 4.7 mL de etanol por cada gramo de posos de café. En la simulación en Aspen Plus, se empleó el reactor de conversión con estequiometría (Rstoic) considerando una conversión de 78% de ácidos grasos libres y de grasas (Yeoh y Ng, 2022). Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Esta corriente es dividida mediante un separador centrífugo (Cfuge). La corriente líquida que contiene biodiésel, ácidos grasos libres, lignina, ácido sulfúrico y metanol, se pasó al separador, mientras que la corriente sólida que contiene celulosa, hemicelulosa, el resto de lignina, entre otros compuestos, se pasa a la hidrólisis enzimática (Yeoh y Ng, 2022).

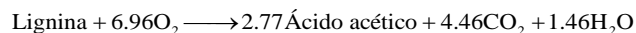
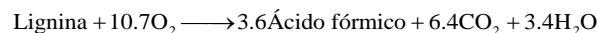
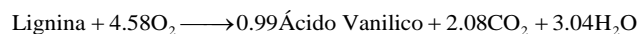
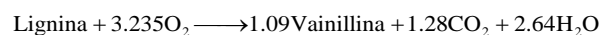
Despolimerización oxidativa

Para la valoración de la lignina con la obtención de productos aromáticos, se siguió el proceso descrito por (Yeoh y Ng, 2022), en el cual primero se precipita la lignina añadiendo agua y se filtra para separarla de los otros componentes. Primero se lleva a cabo en un reactor Rstoic la siguiente reacción química:



Posteriormente, en el filtro se separa la corriente líquida de los sólidos, representado en Aspen como

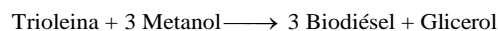
la fracción líquida y la fracción de sólidos igual a 1 en su salida correspondiente. Mas adelante, en un reactor de conversión se llevan a cabo las reacciones de despolimerización oxidativa, de acuerdo con lo reportado por Yeoh y Ng (2022) con las siguientes reacciones:



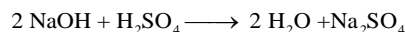
Para separar los componentes orgánicos y aromáticos de la mezcla líquida, se empleó una membrana, para posteriormente, purificar los productos de valor agregado mediante columnas de destilación (Yeoh y Ng, 2022).

Transesterificación

Siguiendo el proceso reportado por Yeoh y Ng (2022), se plantea un separador flash para eliminar el hexano de la corriente. Posteriormente, se realiza la transesterificación en un reactor de conversión a 60°C, 1 bar de presión y 1 hora de reacción. Con estas condiciones se tiene un rendimiento del 90%. La reacción química en este proceso es la siguiente:



Mediante un separador flash se retira el metanol y, posteriormente, se lleva a cabo la reacción de neutralización en un reactor de conversión a 40°C y 1 bar de presión. La reacción química llevada a cabo en este reactor es la siguiente (Yeoh y Ng, 2022):

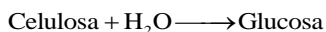


Luego se realiza una separación para obtener biodiésel con una mayor pureza (Yeoh y Ng, 2022).

Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática es llevada a cabo en un reactor Rstoic a 50°C añadiendo 6.3 g de celulasa por cada kilogramo de celulosa. Siguiendo una

conversión, el 0.774 de la celulosa es transformada en glucosa (Nietzche, 2016).



Fermentación ABE

La fermentación se lleva a cabo en un reactor batch a una temperatura constante de 39°C y 1 atmósfera de presión, por 32 h de operación. Para la fermentación se considera una cepa *Clostridium acetobutylicum*. El modelo que describe la fermentación se describe como sigue (Darkwah et al. 2018),

$$\frac{dPM}{dt} = k_1 m_s \frac{K_1}{K_1 + m_B} PM - 0.56(PM - 1)PM \quad (1)$$

$$\frac{dm_X}{dt} = 0.56(PM - 1)m_X - k_2 m_B m_X \quad (2)$$

$$\frac{dm_S}{dt} = -k_3 m_s m_X - k_4 \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X \quad (3)$$

$$\frac{dm_{BA}}{dt} = k_5 m_s \frac{K_1}{K_1 + m_B} m_X - k_6 \frac{m_{BA}}{K_{BA} + m_{BA}} m_X \quad (4)$$

$$\frac{dm_B}{dt} = k_7 m_s m_X - 0.841 \frac{dm_{BA}}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dm_{AA}}{dt} = k_8 \frac{m_S}{K_S + m_S} \frac{K_1}{K_1 + m_B} m_X - k_9 \frac{m_{AA}}{K_{AA} + m_{AA}} \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X \quad (6)$$

$$\frac{dm_A}{dt} = k_{10} \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X - 0.484 \frac{dm_{AA}}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dm_E}{dt} = k_{11} \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X \quad (8)$$

$$\frac{dm_{CO_2}}{dt} = k_{12} \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X \quad (9)$$

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = k_{13} \frac{m_S}{K_S + m_S} m_X + k_{14} m_s m_X \quad (10)$$

donde K_I es la constante de inhibición (g de butanol/L), K_S es la constante de Monod (g de sustrato/L), K_{BA} es la constante de saturación del ácido butírico (g de ácido butírico/L), K_{AA} es la constante de saturación del ácido acético (g de ácido acético/L), k_n son las constantes cinéticas de la reacción. Los términos m_A , m_B , m_E , m_{BA} , m_{AA} , m_S , m_q , m_{CO_2} , m_{H_2} y m_z representan la concentración (g/L) de acetona, butanol, etanol, ácido butírico, ácido

acético, glucosa, biomasa, dióxido de carbono, hidrógeno y marcador fisiológico (adimensional) respectivamente.

Análisis de sensibilidad

Se encontraron las condiciones óptimas de operación para algunas de las operaciones unitarias empleando un análisis de sensibilidad. En este se visualizaba primero el efecto de la presión en los flujos máscicos de salida de un determinado equipo. Después se eligió un valor que fuera conveniente de acuerdo con las necesidades del proceso. De manera análoga se realizó con la temperatura. Se observó cómo iban cambiando los flujos máscicos de salida con la temperatura y se seleccionó una, considerando las necesidades del proceso y el posible costo que esto tendría.

Resultados y Discusión

El diagrama de flujo de la simulación se muestra en Figura 2, donde se observan los distintos procesos unitarios y como se llevó a cabo la separación de sus productos generados.

Transesterificación

En el tanque flash 1 se separa la mayor cantidad de hexano, por medio de la corriente de vapor con la menor fracción de biodiésel. Se consideró una presión de 10000 Pa debido a que el hexano es el componente ligero del sistema. Mediante un análisis de sensibilidad se varió la temperatura de 0 a 200°C, considerando una base propuesta de 75°C (Yeoh y Ng, 2022). Esto es debido a que el proceso se ve favorecido a altas temperaturas sin modificar significativamente las propiedades de los componentes.

En la Figura 3 se observa que a partir de 20°C incrementa la cantidad de biodiésel en la corriente de hexano, y a partir de 55°C el incremento es mayor. Posteriormente, se realizó el análisis de sensibilidad para evaluar la pureza del biodiésel producido. En el tanque flash 3 se consideraron cambios desde 10000 a 100000 Pa debido a que la separación de los componentes involucrados se ve favorecida al aumentar la presión del sistema Yeoh y Ng (2022).

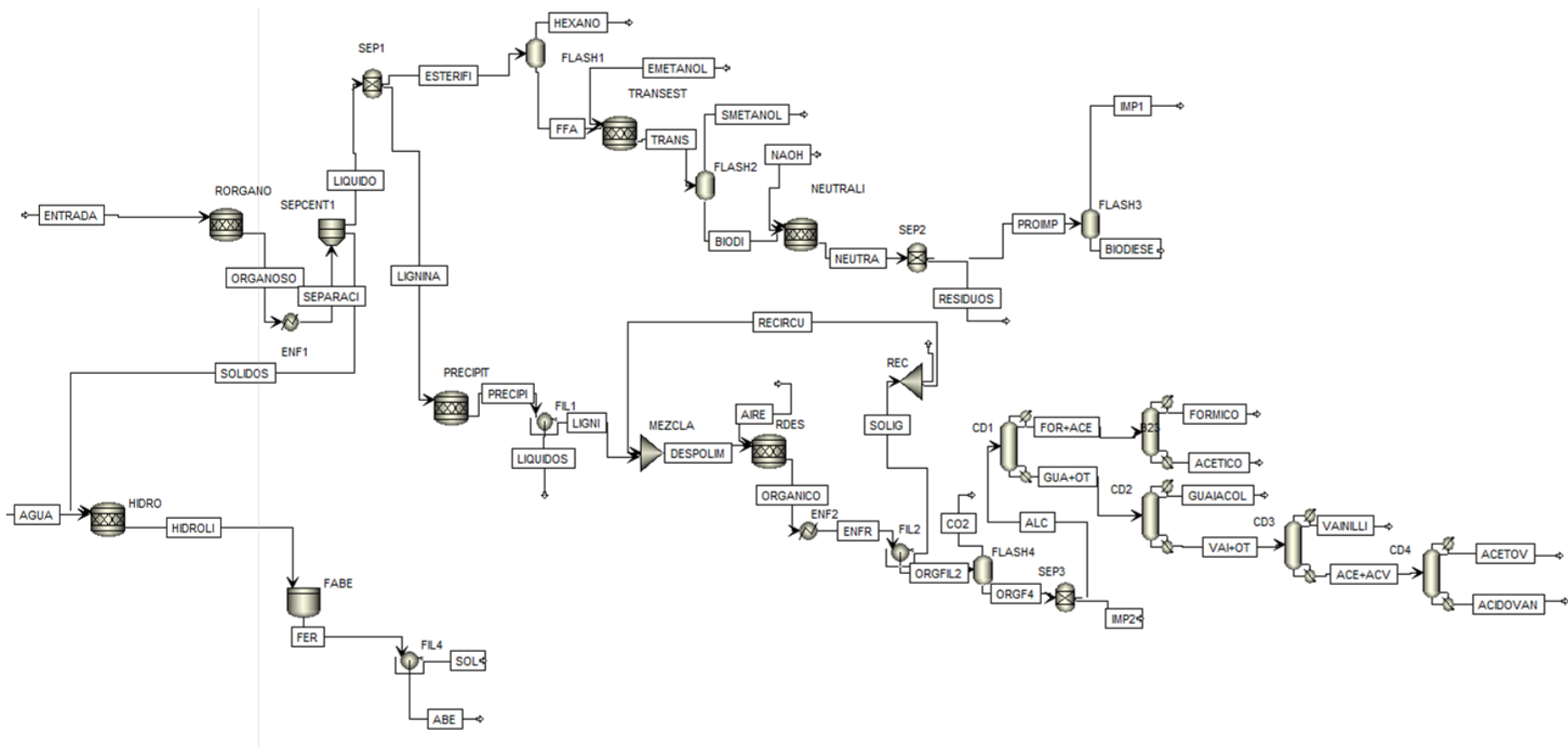


Figura 2. Simulación del proceso en Aspen Plus donde Rorgano, Tranest, Neutrali, Precipit, Rdes, Hidro y Fabe son los reactores donde se lleva a cabo el pretratamiento Organosolv, transesterificación, neutralización, precipitación, despolimerización oxidativa, hidrólisis enzimática y fermentación ABE respectivamente. SEPCENT1 la separadora centrífuga, Flashn los separadores flash, y CDn las columnas de destilación.

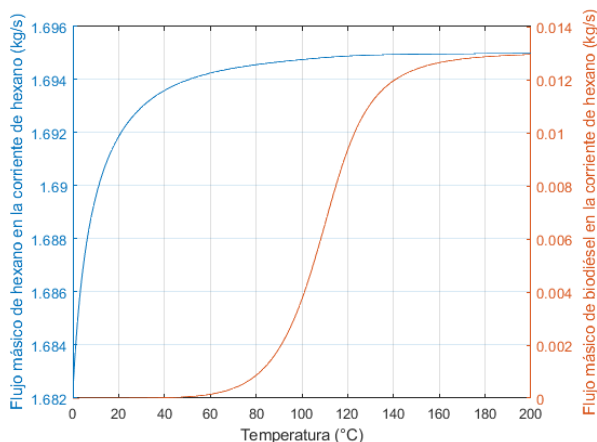


Figura 3. Efectos de la variación de la temperatura en el bloque Flash1

En la Figura 4 se puede observar que a menores presiones se tiene una fracción másica de biodiésel mayor. Considerando que variar la presión tiene un costo de diseño mayor que cambiar la temperatura, se seleccionó la presión de 25000 Pa (Benítez-Hernández et al., 2007).

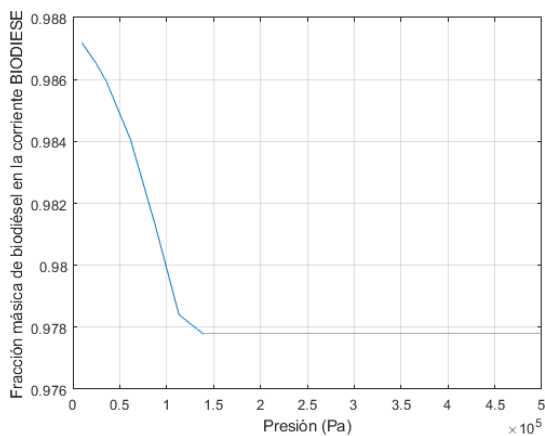


Figura 4. Efectos de la variación de la presión en el bloque Flash3

Posteriormente, se realizó el análisis de la temperatura en un intervalo de 0 a 300°C con una base propuesta de 167°C para identificar si cambios positivos o negativos favorecen la separación. Se calcularon la fracción másica de biodiésel y el flujo másico en la corriente líquida.

En la Figura 5 se observa que la pureza aumenta hasta alcanzar los 285°C, después disminuye de manera abrupta junto con el flujo másico. Considerando una temperatura de 130°C se obtienen 0.05413 kg/s de biodiésel con una pureza de 98%.

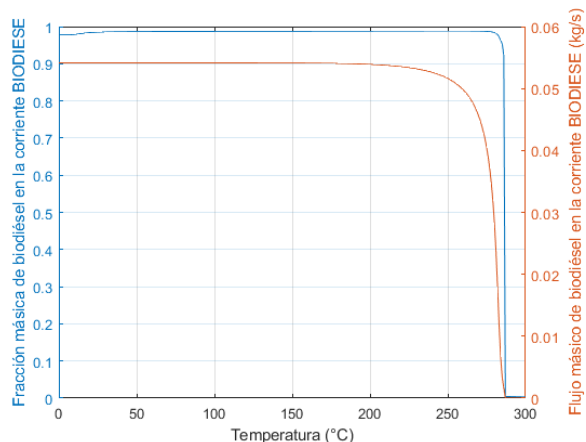


Figura 5. Efectos de la variación de la temperatura en el bloque Flash3

Despolimerización oxidativa

Buscando una mayor cantidad de ácido fórmico en la corriente ORGF4, el análisis de sensibilidad se realizó en el separador flash 4. Se evaluó la presión desde 100000 hasta 1000000 Pa de acuerdo con las condiciones propuestas por Yeoh y Ng (2022).

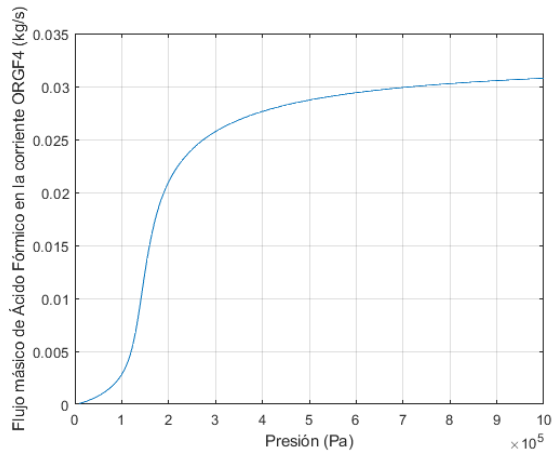


Figura 6. Efectos de la variación de la presión en el bloque Flash4

En la Figura 6 se observa que el flujo de ácido fórmico se incrementa proporcionalmente a la presión. Considerando que el coeficiente de presión empleado en el cálculo del costo de diseño del equipo incrementa, un 25% a 300000 Pa y un 45% a 400000 Pa respecto a la presión atmosférica, se seleccionó la presión de 300000 Pa. (Benítez-Hernández et al., 2007). Con la presión establecida, se realizó un nuevo análisis de sensibilidad para ese bloque, variando la temperatura de -50 a 50°C, debido a que

originalmente la temperatura era de 35°C (Yeoh y Ng, 2022).

En la Figura 7 se puede visualizar que a una menor temperatura se tiene mayor cantidad de ácido fórmico, pero también se incrementa el dióxido de carbono, por lo que se propuso disminuir la temperatura a -30°C. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3. Cabe destacar que, al compararlos con los obtenidos con las condiciones de operación iniciales, se obtuvo un aumento en la cantidad de los productos de valor agregado, siendo el incremento más significativo del 26.32% del ácido fórmico y del 18.67% para el ácido acético.

Tabla 3. Compuestos obtenidos a partir de la lignina

Componente	Sin optimizar (kg/s)	Óptimos (kg/s)	% variación
Ácido Fórmico	0.02540581	0.03209361	26.32%
Ácido Acético	0.00988967	0.01173644	18.67%
Guaiacol	0.00583150	0.00588831	0.97%
Vainillina	0.01069842	0.01069914	0.00%
Acetovanillona	0.00261875	0.00261885	0.00%
Ácido Vanílico	0.00853933	0.00853936	0.00%

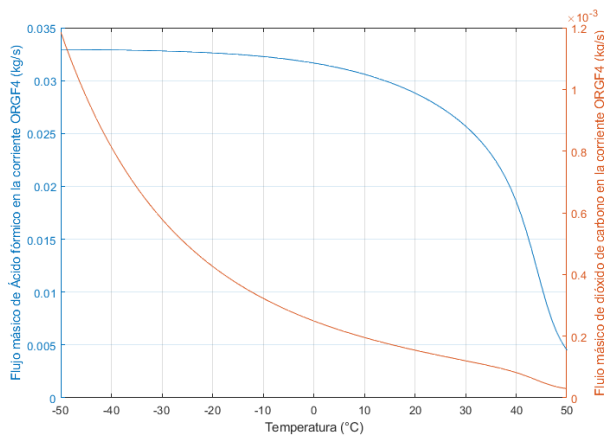


Figura 7. Efectos de la variación de la temperatura en el bloque Flash4

Fermentación ABE

Para corroborar que la subrutina realizada en Fortran es válida, los resultados se compararon con los realizados en MATLAB (Figura 8), los cuales coinciden con los reportados por Darkwah et al. (2018). Al realizar la simulación conjunta, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.

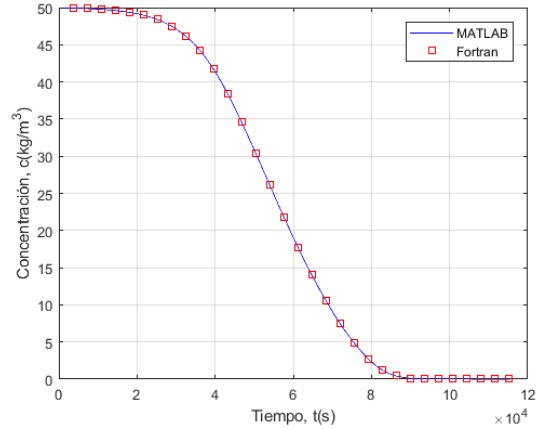


Figura 8. Comparación de resultados obtenidos con Fortran y MATLAB

Al realizar la simulación conjunta, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.

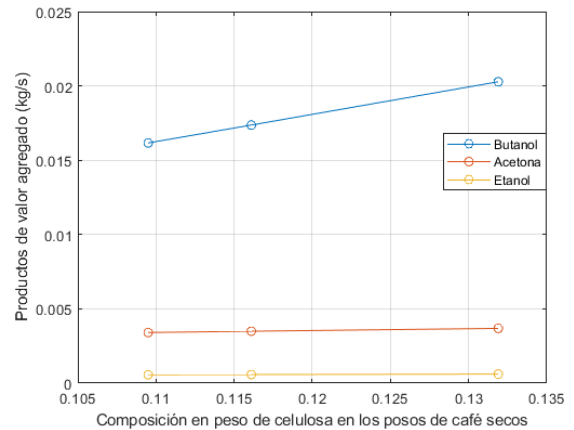


Figura 9. Efecto de la variación de celulosa

Variación de la composición

Con la simulación con las diferentes composiciones descritas en la parte metodológica se obtuvieron las Figuras 9 y 10. En ellas se puede observar que conforme aumenta la composición de celulosa o lignina en los posos de café, se incrementan los productos de valor agregado producidos.

Tabla 4. Compuestos obtenidos a partir de la fermentación

Componente	Salida (kg/s)
Butanol	0.0161444
Acetona	0.0034028
Etanol	0.0005639

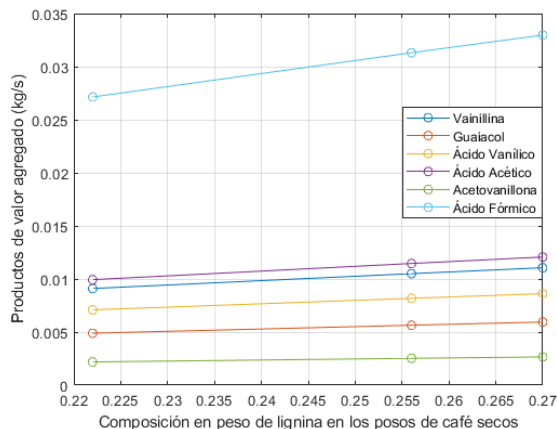


Figura 10. Efecto de la variación de lignina

Conclusiones

En este trabajo se propuso el diseño conceptual de una biorrefinería de posos de café para la generación de productos de valor agregador como ácido fórmico, ácido acético, acetovanilona, ácido vanílico, vainillina, guaiacol, biodiésel, biobutanol y acetona. Los resultados de la simulación de la biorrefinería mostraron que es posible mejorar la obtención de los productos de valor agregado. El análisis de sensibilidad permite determinar las condiciones operativas que mejoran el rendimiento de los productos. El ajuste de temperatura del bloque FLASH4, permitió un incremento en la producción de los compuestos ligeros, ácido fórmico y acético, de 26.32% y 18.67% respectivamente. Entonces, la estrategia basada en el acoplamiento del software Aspen Plus y Fortran para incluir los efectos de los procesos biológicos en la biorrefinería mejora su descripción y permite un análisis más profundo, lo cual puede ser una guía útil para la implementación de la biorrefinería a escala piloto.

Referencias

- Abdelaziz, O. Y., Al-Rabiah, A. A., El-Halwagi, M. M., y Hulteberg, C. P. (2020). Conceptual Design of a Kraft Lignin Biorefinery for the Production of Valuable Chemicals via Oxidative Depolymerization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(23), 8823-8829.
- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., y Kaltschmitt. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76.
- Alibaba. (2022a). Acetone-Free Fragrance Scent Nail Polish Remover Liquid. https://www.alibaba.com/product-detail/Acetone-Free-Fragrance-Scent-Nail-Polish_62342474939.html
- Alibaba. (2022b). Factory bulk supply varnish solvent N-butanol normal butanol with free sample CAS: 71-36-3. https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-bulk-supply-varnish-solvent-N_1600434257879.html
- Alibaba. (2022c). High pure 95% ethyl alcohol ethanol. https://www.alibaba.com/product-detail/High-pure-95-ethyl-alcohol-ethanol_1600454396983.html
- Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., Kumar, G., Saratale, G. D., Aslam, M., Khan, H. A., Said, Z., & Mahmoud, E. (2019). Valorization of spent coffee grounds into biofuels and value-added products: Pathway towards integrated bio-refinery. *Fuel*, 254, 115640.
- Ballesteros, L.F., Teixeira, J.A., y Mussatto, S.I. (2014). Chemical, functional and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3493-3503.
- Benítez-Hernández, A., Martínez-Ochoa, Y., y Domínguez-Alonso, F. J. (2007). *Tecnología Pinch: Introducción a la Integración Energética*. Universidad de Matanzas.
- Darkwah, K., Nokes, S. E., Seay, J. R., y Knutson, B. L. (2018). Mechanistic simulation of batch acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation with in situ gas stripping using Aspen Plus™. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 41(9), 1283-1294.
- International Coffee Organization. (2020). Total production by all exporting countries. <https://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>
- Irenia. (2017). Biogas Cost Reductions to Boost Sustainable Transport. <https://irena.org/newsroom/articles/2017/Mar/Biogas-Cost-Reductions-to-Boost-Sustainable-Transport>
- Jung, K., Choi, B.H., Hwang, M., Jeong, T., y Ahn, K. (2016). Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. *Bioresource Technology*, 219, 185-195.
- Kontogeorgis, G.M., Michelsen, M.L., Folas, G.K., Derawi, S., Solms, N., y Stenby, E.H. (2007). Ten

Years with the CPA (Cubic-Plus-Association) Equation of State. Part 1. Pure Compounds and Self-Associating Systems. Industrial and Engineering Chemical Research, 45(14), 4855-4868.

Lee, M., Yang, M., Choi, S., Shin, J., Park, C., Cho, S., y Kim, Y.M. (2019). Sequential Production of Lignin, Fatty Acid Methyl Esters and Biogas from Spent Coffee Grounds via an Integrated Physicochemical and Biological Process. Energies, 12(2360).

Mata, T. M., Martins, A. A., y Caetano, N. S. (2018). Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization. Bioresource Technology, 247, 1077–1084.

Nitzsche, R., Budzinski, M., y Gröngröft, A. (2016). Techno-economic assessment of a wood-based biorefinery concept for the production of polymer-grade ethylene, organosolv lignin and fuel. Bioresource Technology, 200(2016), 928-939.

Panusa, A., Zuorro, A., Lavecchia, R., Marrosu, G., y Petrucci, R. (2013). Recovery of Natural Antioxidants from Spent Coffee Grounds, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 61, 17, 4162-4168.

Yeoh, L., y Ng, K.S. (2022). Future Prospects of Spent Coffee Ground Valorisation Using a Biorefinery Approach. Resources, conservation and recycling, 179, 106123.