

Evaluación energética económica de una biorrefinería para producción de bioturbosina An energy economic evaluation of a biorefinery for biokerosene production

A. O. Piña-Mariscal ^a, R. Sotelo-Boyás ^{a,*}, A. Domínguez-Téllez ^a, R. Flores-Velazquez ^b

^aInstituto Politécnico Nacional. ESQIE. Ciudad de México, 07738, Mexico.

^bUniversidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Química e Ingeniería, Cuernavaca, Morelos, 62209, México.

Resumen

La producción sostenible de biocombustibles requiere tanto el diseño de procesos económicamente viables con bajo impacto ambiental, como contar con una materia prima que se produzca de manera sostenible y sea elegible bajo los criterios de sostenibilidad del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA). Con el objetivo de desarrollar un proceso viable en México para la producción de bioturbosina, se seleccionó el sorgo dulce como materia prima. El proceso se diseñó conceptualmente en Aspen Plus V14.5 y comprende dos secciones: producción de bioetanol con una capacidad de 9,445 barriles por día (BPD), y producción de SAF mediante la tecnología ATJ (Alcohol-to-Jet) con una capacidad de producción de 2500 BPD de SAF. Este estudio permitió obtener las condiciones de operación a las cuales la planta de bioturbosina es técnica, económica y ambientalmente viable, demostrando que el uso de sorgo dulce representa una alternativa prometedora para la producción sostenible de combustibles de aviación en México.

Palabras Clave: Bioturbosina, Simulación Energética y Económica, Sorgo Dulce, Biorrefinería, Bioetanol.

Abstract

The sustainable production of biofuels requires both the design of economically viable processes with low environmental impact, as well as having a feedstock (biomass) that is produced sustainably and is eligible under the sustainability criteria of the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). To develop a viable process in Mexico for the production of biojet fuel, sweet sorghum was selected as a raw material. The process was conceptually designed in Aspen Plus V14.5 and comprises two sections: bioethanol production with a capacity of 11,600 barrels per day (BPD), and SAF production using ATJ (Alcohol-to-Jet) technology with a production capacity of 2500 BPD of SAF. This study allowed to obtain the operating conditions at which the SAF plant is technically, economically and environmentally viable, demonstrating that the use of sweet sorghum represents a promising alternative for the sustainable production of aviation fuels in Mexico.

Keywords: Biokerosene, Technical and Economical Simulation, Sweet Sorghum, Biorefinery, Bioethanol.

1. Introducción

El impacto ambiental generado por el uso de los combustibles derivados del petróleo ha motivado la búsqueda de nuevas fuentes de energías renovables, dentro de las cuales se encuentra la biomasa. La transformación de biomasa se lleva a cabo en biorrefinerías donde mediante una serie de procesos bioquímicos y termoquímicos se producen biocombustibles como bioetanol, bioturbosina, biogás, etc.

1.1 Sorgo Dulce

En la actualidad, se han realizado esfuerzos para seleccionar una biomasa con las propiedades adecuadas para producir bioetanol, la principal materia prima del SAF en la ruta tecnológica conocida como Alcohol-to-Jet (ATJ). Se han desarrollado procesos de producción de bioetanol extensos utilizando maíz (Tanzil et al., 2021), caña de azúcar (Wei et al., 2019), racimo de fruta de palma (Vaskan et al., 2018), paja de trigo (Mupondwa et al., 2017) y por Sorgo (Davila-Gomez et al., 2011).

El sorgo dulce tiene la ventaja de tener concentraciones altas en azúcares (11-17 °Brix), no es un cultivo alimenticio a diferencia del maíz o la caña de azúcar, también soporta condiciones climáticas adversas, como la sequía o la salinidad

*Autor para la correspondencia: rsotelo@ipn.mx

Correo electrónico: apinam1300@alumno.ipn.mx (Alan Osvaldo Piña-Mariscal), rsotelo@ipn.mx (Rogelio Sotelo-Boyás), tellezantonio920@gmail.com (Antonio Domínguez-Téllez), roberto.flores@uaem.mx (Roberto Flores-Velazquez).

(Mathur et al., 2017) y se puede cultivar en casi todos los estados de México.

planta en dos secciones por separado: Producción de bioetanol y Producción de SAF (ATJ).

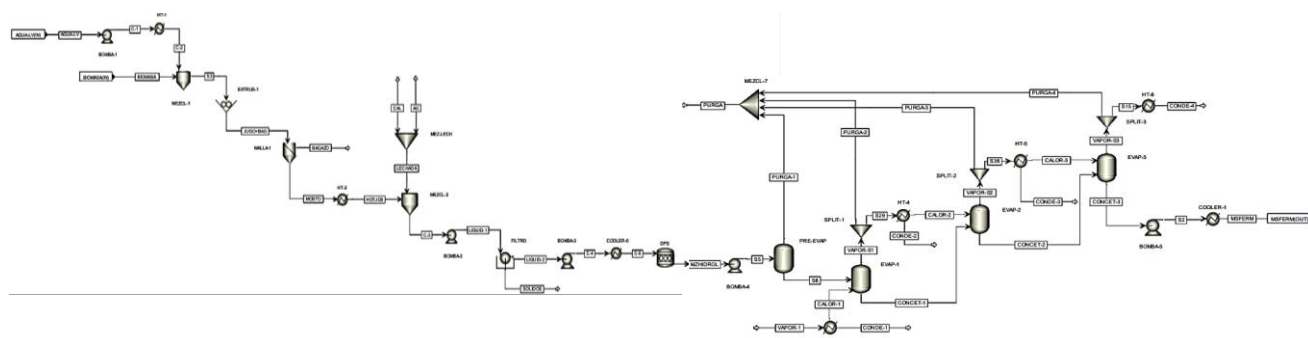


Figura 1: Planta de bioetanol

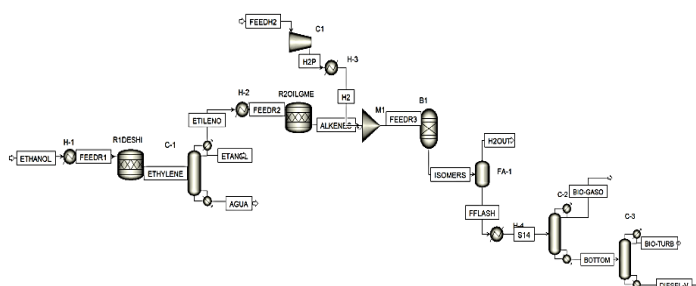


Figura 2: Planta de ATJ

1.2 Análisis Pinch

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de integración energética mediante la aplicación de la metodología Pinch en una planta de producción de SAF. Esta metodología se emplea en el diseño y optimización de procesos industriales con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la energía disponible. Consiste en identificar las corrientes que pueden transferir calor, para recuperar su energía y transferirla a aquellas que lo requieran, lo que permite reducir el consumo de energía proveniente de fuentes externas al proceso. (Coker & Sotudeh-Gharebagh, 2022; Smith, 2005)

El análisis Pinch proporciona una estrategia para diseñar y ubicar intercambiadores de calor de manera que se maximice el aprovechamiento de calor recuperado. La implementación de la integración energética resulta clave para lograr procesos más eficientes desde el punto de vista energético. (Coker & Sotudeh-Gharebagh, 2022; Smith, 2005)

Este análisis se realizó con la finalidad de reducir el consumo de energía de la planta, y demostrar que la implementación de este tipo de estudio es fundamental en cualquier industria para optimizar el consumo de energía. Además, realizar este análisis aporta beneficios tanto ambientales como económicos al disminuir el consumo de energía de las plantas.

2. Metodología

2.1. Diseño conceptual

El diseño de la biorrefinería de SAF consistió en la conceptualización en Aspen Plus, donde se modeló y simuló la

Se planteó una capacidad de la planta de bioetanol de 11,600 BPD. El proceso inicia con un pretratamiento del tallo de sorgo dulce, posteriormente se extrae el jugo y el bagazo, el jugo limpio de bagazo es enviado al tren de evaporación de efectos múltiples para concentrar los grados Brix del jugo. A su salida el jugo concentrado es enviado al proceso de fermentación, para transformar los azúcares sencillos a bioetanol y dióxido de carbono, este último es enviado a tres columnas para su purificación. El bioetanol producido tiene un grado de pureza de 98.9 %. El esquema simulado de esta sección se muestra en la Figura 1.

La Figura 2 muestra el proceso ATJ, que comienza con la deshidratación de etanol y el etileno producido se purifica, y posteriormente se alimenta al reactor de oligomerización. Los productos de oligomerización consisten en olefinas de cadenas desde C_3 a C_{18} , y estas se alimentan a un tercer reactor donde se hidrogenan e isomerizan. Por último, en un tren de separación, se extrae el hidrógeno restante y los distintos cortes de hidrocarburos obtenidos: Gas LP verde, biogasolina, bioturbosina y diesel verde.

El proceso se simuló en ASPEN Plus V 14.5 con los métodos termodinámicos ELECNRTL para la primera sección y PENG ROBINSON para la segunda sección.

2.2. Integración energética

El análisis Pinch se realizó usando las tres reglas de oro:

- A través del punto Pinch no debe transferirse calor.
- Arriba del punto Pinch solo tienen que usarse servicios de calentamiento.

- Abajo del punto Pinch solo tienen que usarse servicios de enfriamiento.

Además, se aplicaron otras reglas de diseño de redes de intercambio de calor secundarias:

- Se debe de respetar el $\Delta T_{\min}$
- Se debe de respetar la segunda ley de la termodinámica; por lo cual, las temperaturas de las corrientes calientes deben de ser mayores a las de las corrientes frías.

Arriba del punto Pinch:

- Se debe diseñar de derecha a izquierda.
- El número de corrientes frías debe ser mayor o igual al de las corrientes calientes.
- El FCp de las corrientes frías debe ser mayor o igual al de las corrientes calientes, de lo contrario se deberán dividir las corrientes.
- Se debe consumir la energía de las corrientes calientes para cumplir con la segunda regla de diseño principal.

Abajo del punto Pinch:

- Se debe diseñar de izquierda a derecha.
- El número de corrientes calientes debe ser mayor o igual al de las corrientes frías.
- El FCp de las corrientes calientes debe ser mayor o igual al de las corrientes frías, de lo contrario se deberán dividir las corrientes.
- Se debe consumir la energía de las corrientes frías para cumplir con la tercera regla de diseño principal.

Para llevar a cabo una buena integración energética, se seleccionó un $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ buscando lograr con ello la mayor recuperación de energía en la planta.

Una vez definida la $\Delta T_{\min}$, se siguieron las reglas de diseño arriba y abajo del Pinch para obtener la gran curva compuesta (Figura 3) y la curva compuesta (Figura 4).

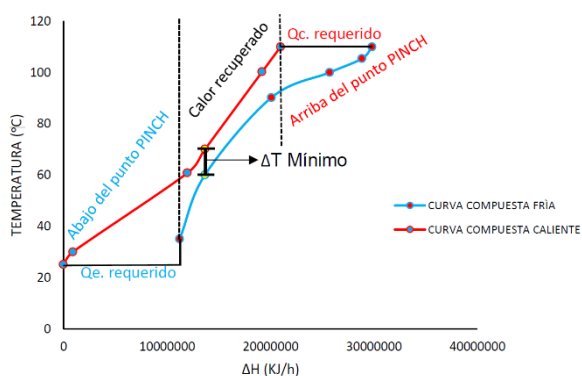


Figura 3: Curva compuesta

Para la integración energética de la planta involucra la presencia de corrientes calientes y frías, las cuales se diferencian por su dirección de flujo térmico. Las calientes van de una zona de alta temperatura a una de baja, mientras que las frías lo hacen en la dirección opuesta. Para la planta de bioetanol se seleccionaron 5 corrientes frías y 5 corrientes calientes, para ATJ se seleccionaron 4 corrientes calientes y 5 corrientes frías.

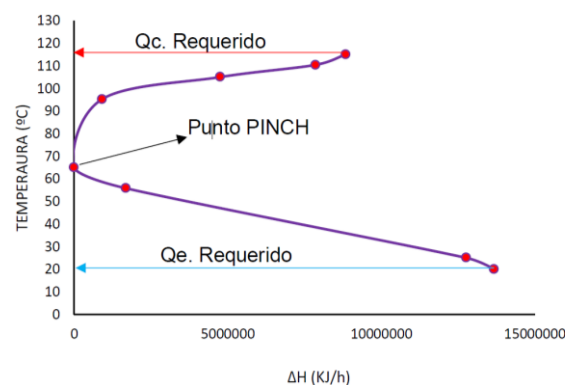


Figura 4: Gran curva compuesta

Por último, se propone realizar el intercambio térmico entre corrientes para aprovechar las cargas térmicas. Se realizó un diagrama de rejilla y se simuló en Aspen Energy Analyzer como se ve en la Figura 5. Dependiendo del resultado se puede repetir este paso hasta obtener una integración energética satisfactoria, donde se ahorre dinero y energía a costa de un aumento en el capital inicial razonable, siendo un valor que no supere el ahorro continuo a través de la vida útil de la planta.

El diagrama de rejilla de la Figura 5 muestra el diseño de la red de intercambiadores de calor donde las líneas azules representan las corrientes frías y las rojas las calientes. Se requieren 6 intercambiadores de calor entre las corrientes que están representados por esferas plata para optimizar el consumo de energía. La corriente superior azul e inferior roja representa el requerimiento de servicios auxiliares, es decir agua de enfriamiento y vapor, respectivamente. Para lo cual se requieren 8 intercambiadores adicionales, teniendo el diseño final 14 intercambiadores de calor con 2 servicios auxiliares.

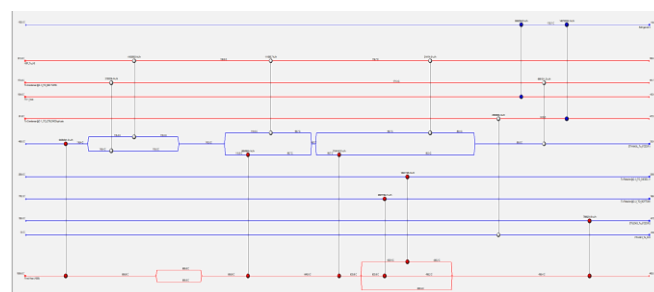


Figura 5: Diagrama de rejilla en Aspen Energy

2.3. Análisis Económico

El análisis económico se realizó con el método Guthrie con un factor de escala de 0.63. Los principales indicadores de rentabilidad revisados fueron: tasa interna de retorno (TIR), periodo de retorno de la inversión (PO), valor presente neto

(VPN), relación costo-beneficio (índice de rentabilidad), gastos de capital (CAPEX) y gastos operativos (OPEX). Se calculó el precio mínimo de venta, el cual asegura utilidad a partir del quinto año de operación.

Se compararon dos casos, modificando el valor de las corrientes del proceso como sigue:

- Caso 1: La planta de bioetanol es un negocio independiente de la planta ATJ, y se desea que sea rentable. Su producto es bioetanol que lo vende a la planta ATJ.
- Caso 2: La planta de bioetanol es parte de la planta de ATJ, por lo tanto, el bioetanol es un producto intermedio y no se comercializa.

Tabla 1. Costos de Etanol y SAF (Compare Jet Fuel Prices for Airports | Globalair.Com, s/f; Teixeira et al., 2024)

Componente	Caso	Precio mínimo de venta	Unidad
Etanol	1	0.85	US\$/L
SAF	1	3.57	US\$/L
	2	1.60	US\$/L

3. Resultados

3.1. Ahorro Económico

La metodología explicada es aplicada primero a la planta individual de bioetanol, los costos de los materiales para ambas plantas se ven en la Tabla 2.

Tabla 2: Costos de materiales

Material	Precio	Unidad	Referencia
Agua/cal	0.11627	US\$/Kg	(QuimiNet)
Levadura	4.05	US\$/Kg	(Mupondwa et al., 2017)
Biomasa	45	US\$/Ton	(Mathur et al., 2017)
CO ₂	0.61	US\$/Kg	(QuimiNet - Información y negocios segundo a segundo, s/f)
H ₂	1.5	US\$/Kg	(QuimiNet - Información y negocios segundo a segundo, s/f)
Agua	13.22	US\$/L	CONAGUA
Biodiesel	1.15	US\$/L	(Alternative Fuels Data Center)
Biogasolina	1.15	US\$/L	(Alternative Fuels Data Center)

En la Figura 6, se observa el ahorro económico en el OPEX de 11.89%, a comparación del CAPEX que aumenta un 0.72%, dando un total de ahorro del 8.84%, que son \$4, 989,167.74 anualmente. No se toma en cuenta el valor de la materia prima ya que es el 90% del OPEX.

La planta de ATJ tiene valores similares a los obtenido en la planta previa, el ahorro anual total es de \$3, 490,097.80 o

bien 5.11%. El CAPEX aumentó 0.53%, mientras que el OPEX se redujo en 6.85%, como se muestra en la Figura 7.

El principal ahorro se ve reflejado en los servicios auxiliares, de 25.08% y 19.42% respectivamente, que equivalen a \$8, 663,607.38 en costos de operación, como se puede ver en la figura 8.

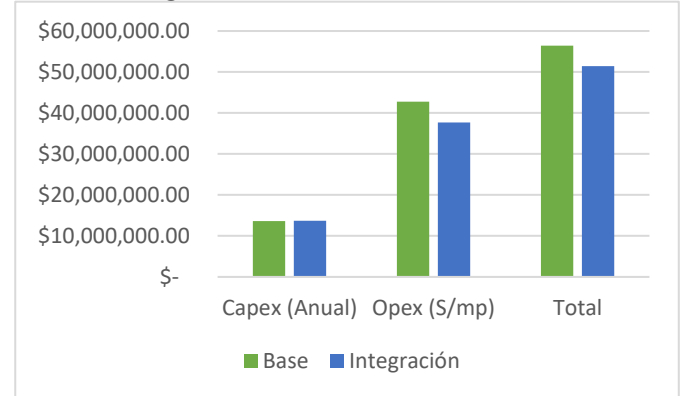


Figura 6: Comparación de la planta de bioetanol con y sin integración energética

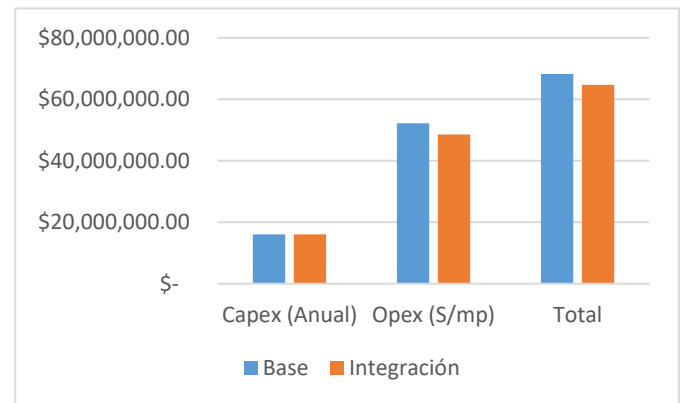


Figura 7: Comparación de la planta de ATJ con y sin integración energética

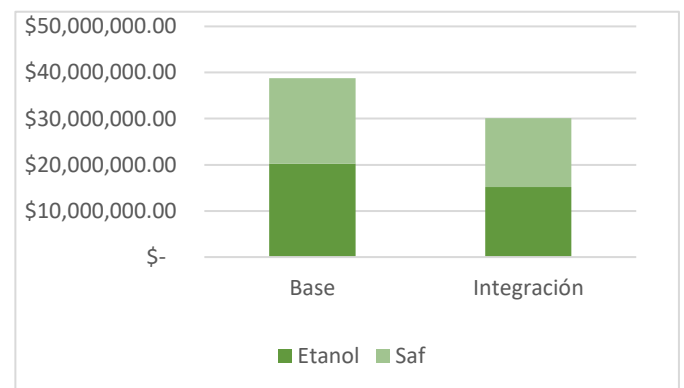


Figura 8: Ahorro económico en servicios auxiliares

3.2. Comparación de casos

Caso 1. La Tabla 3 muestra los indicadores económicos de ambas plantas cuando la planta de Etanol tiene utilidad. Esto

provoca que la planta ATJ tenga que dar un precio poco competitivo por el producto, de \$3.57, además de que el OPEX es 3 veces mayor al de la planta de bioetanol que produce 9,945 barriles más de producto. El CAPEX, de la planta de Bioetanol es 5.8 veces más cara que la de SAF, principalmente por los bio reactores y las columnas de destilación que obtienen etanol anhidro, incrementado el costo de inversión de equipos e instalación. El VPN es 5.6 veces mayor para la planta de bioetanol, generando más ganancia por año, por lo tanto en este escenario, es una inversión con mejores rendimientos por año.

Tabla 3: Indicadores Económicos del Caso 1

Planta	Indicador	Valor	Unidad
Bioetanol	PO	4.91	Años
	TIR	19.46	%
	VPN	192,539,479.37	US\$
	CAPEX	272,821,171.66	US\$
	OPEX	173,924,555.48	US\$/año
ATJ	PO	4.91	Años
	TIR	19.76	%
	VPN	34,525,265.97	US\$
	CAPEX	47,313,651.96	US\$
	OPEX	528,662,939.36	US\$/año

Caso 2. Al combinar ambas plantas en una sola, solo es necesaria la evaluación económica de ATJ contemplando el Etanol como producto intermedio no como materia prima, y así, sumar el CAPEX y OPEX obtenido de la planta de Etanol. También se calculó el valor de la relación costo beneficio (IP) que es de 1.04 y 0.14 para el primer caso y 1.09 para el segundo.

Tabla 4: Indicadores Económicos del Caso 2

Indicador	Valor	Unidad
PO	4.91	Años
TIR	19.66	%
VPN	231,105,201.68	US\$
CAPEX	320,134,823.63	US\$
OPEX	185,330,908.84	US\$/año

4. Conclusiones

Con la aplicación de la integración energética ha sido posible diseñar conceptualmente un proceso más económico, para la producción de SAF. Se ahorran 8.6 millones de dólares anualmente al aplicar la metodología Pinch, a costa de un incremento de costo de capital de 3.6 millones de dólares, aumento que solo se aplica en el capital inicial de la planta. El sorgo es una alternativa para producir SAF de manera sostenible en México por la calidad, cantidad y procesos disponible del cultivo.

Tanto el Caso 1 como el Caso 2 son técnicamente factibles para su implementación industrial. Económicamente el caso 2 da mejores proyecciones, la relación costo beneficio es mayor y el VPN también, indicando mayores ganancias a lo largo del tiempo de vida útil de la empresa.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo obtenido a través del proyecto SIP: 20242131.

Referencias

- Alternative Fuels Data Center: Fuel Prices.* (s/f). Recuperado el 15 de julio de 2025, de <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html>
- Coker, A. K., & Sotudeh-Gharebagh, R. (2022). *Chemical process engineering. Volume 2: Heat transfer & process integration, process safety, chemical kinetics & reactor design, engineering economics, optimization, epilogue.* Scrivener Publishing.
- Compare 100LL & jet fuel prices for airports near BOB HOPE bur | Globalair.com.* (s/f). Recuperado el 15 de julio de 2025, de <https://www.globalair.com/airport/fuelmap.aspx?aptcode=bur&av=pu&rad=50&factype=airport&rw=any&app=&fuelsaf=true&fuelbrand=>
- Davila-Gomez, F. J., Chuck-Hernandez, C., Perez-Carrillo, E., Rooney, W. L., & Serna-Saldivar, S. O. (2011). Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Industrial Crops and Products*, 33(3), 611–616. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.022>
- Mathur, S., Umakanth, A. V., Tonapi, V. A., Sharma, R., & Sharma, M. K. (2017). Sweet sorghum as biofuel feedstock: Recent advances and available resources. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0834-9>
- Mupondwa, E., Li, X., & Tabil, L. (2017). Large-scale commercial production of cellulosic ethanol from agricultural residues: A case study of wheat straw in the Canadian Prairies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(6), 955–970. <https://doi.org/10.1002/bbb.1800>
- QuimiNet—Información y negocios segundo a segundo.* (s/f). Recuperado el 15 de julio de 2025, de <https://www.quiminet.com/>
- Smith, R. (2005). *Chemical process design and integration.* Wiley.
- Tanzil, A. H., Zhang, X., Wolcott, M., Brandt, K., Stöckle, C., Murthy, G., & Garcia-Perez, M. (2021). Evaluation of dry corn ethanol bio-refinery concepts for the production of sustainable aviation fuel. *Biomass and Bioenergy*, 146, 105937. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105937>
- Teixeira, A. T., Da Silva, A. C. M., Cavalcante, R. M., & Young, A. F. (2024). Process simulation and economic evaluation of the Alcohol-to-Jet production of sustainable aviation fuel in the Brazilian context. *Energy Conversion and Management*, 319, 118947. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118947>
- Vaskan, P., Pachón, E. R., & Gnansounou, E. (2018). Techno-economic and life-cycle assessments of biorefineries based on palm empty fruit bunches in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3655–3668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.218>
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254, 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>