



ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE BIOMASA EN MÉXICO

Nereyda Vanessa Hernández-Camacho ^{a,*}, Fernando Israel Gómez-Castro ^a, José María Ponce-Ortega ^b, Mariano Martín ^c.

^a Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.
nv.hernandezcamacho@ugto.mx.

^b Departamento de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N, Morelia, Michoacán, 58060, México.

^c Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Salamanca, Pza. Caídos 1-5, Salamanca, 37008, España.

Resumen

En este trabajo se aborda el análisis del potencial de producción de metanol a partir de fuentes renovables, analizando los distintos tipos de residuos presentes en México y seleccionado a 12 distintos que presentan la mayor disponibilidad anual. Las tecnologías seleccionadas para la producción de metanol son gasificación, pirólisis, digestión anaerobia y síntesis mediante CO₂, dependiendo del tipo de biomasa se selecciona la más adecuada. Se desarrolló un caso de estudio de maximización de ganancia de la cadena de suministro de metanol partiendo de bagazo de trigo y sorgo mediante gasificación. Se ha obtenido una ganancia de 5,651,900.00 USD anuales para una producción de 504,850.0 toneladas de metanol, en dos plantas ubicadas en Guanajuato y Sonora, abasteciendo a cinco mercados distintos.

Palabras clave: metanol; recursos renovables; optimización; superestructura; cadena de suministro.

ANALYSIS OF THE POTENCIAL OF METHANOL PRODUCTION FROM BIOMASS WASTE IN MEXICO

Abstract

In this work, the analysis of the potential for production of methanol from renewable sources is developed. The different types of waste in Mexico were analyzed, and the 12 residues with the highest



annual availability were selected. The technologies selected to produce methanol were gasification, pyrolysis, anaerobic digestion, and synthesis by CO₂. A case study was developed to maximize the profit of the methanol supply chain from wheat and sorghum with gasification. As a result, a profit of 5,651,900.00 USD/y for a production of 504,850.0 t/y of methanol in two plants located in Guanajuato and Sonora, to satisfy 5 different markets.

Keywords: methanol; renewable resources; optimization; superstructure; supply chain.

1. Introducción

La creación de nuevos proyectos e ideas es influenciada por las necesidades de mayor relevancia en la población, siendo los problemas ambientales uno de los ejes principales sobre el cual giran muchas de las nuevas aportaciones en décadas recientes. Es posible mencionar tres grandes áreas con importantes opciones de mejora: el sector energético, el sector transporte y el sector industrial. A su vez, estos tres sectores son los de mayor aporte de emisiones de CO₂ en México, (Transparency Climate, 2020).

La mayoría de estas nuevas aportaciones no solo buscan minimización de costos, sino además una minimización de impacto ambiental y en diversos casos impacto social. Estos tipos de mejoras incluyen la implementación de fuentes renovables que puedan reemplazar a los combustibles fósiles; dos de los más relevantes son el

uso de energía solar para fines energéticos y el uso de biomasa tanto para fines energéticos como de generación de bioproductos.

El presente trabajo busca generar un impacto positivo en el sector industrial con la modificación de las fuentes de obtención de metanol en México, lo cual implica a su vez cambios en los procesos productivos. Comúnmente la producción de este material se lleva a cabo a partir de gas natural como materia prima, siendo PEMEX el mayor productor, contando solo con el Complejo Petroquímico Independencia (CPI) ubicado en Puebla, para su producción. Este complejo en diversas ocasiones no se ha utilizado en toda su capacidad o incluso ha presentado imprevistos por falta de la materia prima, mostrando evidentes pérdidas al no cumplir con las demandas establecidas



(Caloca-Moreno y Medina-Estrada, 2016). Además, se han registrado compras internacionales de metanol de hasta aproximadamente 162,442.4 toneladas al año (Harris y col. 2021; Secretaría de Economía, 2021), debido a que la producción dentro del país no es suficiente para abastecer la demanda; demostrando la necesidad de buscar otro tipo de alternativas de producción de metanol sin depender exclusivamente del gas natural y que exista la capacidad de cubrir la demanda nacional. Es por ello que en este trabajo se realizará un análisis de residuos y tecnologías de procesamiento para determinar el panorama de las opciones renovables existentes en México para la producción de metanol, haciendo uso de superestructuras y la programación disyuntiva generalizada (GDP). Algunos trabajos como el de Espinoza-Vazquez y col. en 2021 realizaron estudios mediante superestructuras y GDP para ácido levulinico y furfural, por otro lado, Contreras-Zarazúa y col. en 2021 también trabajaron con superestructuras en la producción de furfural utilizando modelado basado en el Rhum line method. Si bien, existen trabajos mediante superestructuras y algunos mediante GDP,

no existe mucha aportación en el tema de producción de metanol mediante nuevas alternativas en México y tampoco sobre la implementación de diversas tecnologías de procesamiento para su producción acorde al tipo de biomasa utilizado.

En este trabajo se busca como alternativa el uso de biomasa como materia prima, debido a que esta no solo se puede emplear para la obtención de energía si no que su versatilidad permite que pueda ser empleada para la obtención de productos químicos, tal como el metanol. Estudios realizados han demostrado que se reduce el requerimiento energético de los procesos al emplear biomasa, en comparación con el uso de carbón, contribuyendo en la mitigación de emisiones de CO₂ (Liu y col., 2020). Por otro lado, presenta costos de venta no tan desfasados con lo reportado para el mercado (Harris y col., 2021), permitiendo con ello ser una opción que trae beneficios en la parte ambiental y económica.

2. Metodología

2.1 Escaneo de residuos disponibles.

Se realizó un escaneo de los distintos tipos de residuos disponibles en México,



pudiendo encontrar en el país las siguientes categorías:

- Residuos agrícolas
- Residuos pecuarios
- Residuos urbanos
- Residuos industriales
- Cultivos especializados
- Tala sustentable

Dentro de estas categorías se encuentra una gran diversidad de opciones, de las cuales se analizaron y seleccionaron las que presentan mayor disponibilidad total anual, además de incluir el CO₂ industrial como una materia prima con alta disponibilidad anual; en la Tabla 1 se muestran los 12 tipos de residuos seleccionados y su disponibilidad máxima anual. De acuerdo con estos residuos, se pueden clasificar en 3 formas distintas: residuos con alto contenido de agua, residuos con poco contenido de agua y residuos con procesamientos particulares (CO₂).

2.2 Tecnologías de procesamiento

Se determinaron las diversas tecnologías que pueden ser empleadas en términos del tipo de residuo presente, esto debido a que existe diversidad de residuos que no

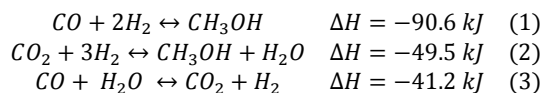
pueden tratarse con las mismas tecnologías, encontrándose tres opciones distintas:

Proceso termoquímico: Para materiales con bajo contenido de agua, pudiendo tratarse ya sea mediante gasificación o pirólisis.

Proceso de Digestión Anaerobia: Para residuos con alto contenido de agua.

Proceso de CO₂: Proceso particular para la síntesis de metanol a partir de CO₂ industrial.

Para el uso de estas tecnologías hay que tener en cuenta que las reacciones generales que se llevan a cabo para obtener metanol son las siguientes:



Dónde es importante resaltar que, dependiendo del tipo de tecnología de procesamiento utilizada, el rendimiento del proceso será distinto, cambiando con ello la cantidad de metanol obtenida para cada uno de ellos. Los rendimientos establecidos para cada tipo de tecnología se muestran en la Tabla 2.



Tabla 1. Residuos de mayor disponibilidad en México (ANBIO,2012; CAT, 2020).

Residuo	Disponibilidad Máxima [t/y]
R. sólidos urbanos	17,586,209.83
Bagazo de caña	17,689,266.38
Bagazo de agave	2,026,575.00
R. aceite vegetal	1,494,257.00
R. Proceso de cerveza	1,430,959.00
Bagazo de café	977,261.00
Aserraderos	728,846.00
Estiercol porcino	55,328.32
Bagazo de maíz	442,335.00
Pollinaza-gallinaza	217,407.00
Bagazo de sorgo	139,689.00
Estiercol bovino	125,241.40
Bagazo de trigo	65,527.00
CO ₂	755,000,000.00

Tabla 2. Rendimientos de las tecnologías de procesamiento de metanol.

Proceso	Rendimiento	Referencia
Gasificación	50.35	Yang y col., 2018.
Pirólisis	51.20	Kasmuri y col., 2017.
Digestión Anaerobia	46.8	Patel y col., 2021.
Síntesis a partir de CO₂	50.00	Martín y Grossmann, 2017.



2.3 Modelado Matemático

Para el análisis de la cadena de suministro en la producción de metanol, se implementa una superestructura que permite encontrar la ruta óptima de acuerdo con un objetivo particular. Para fines de este trabajo se presenta un caso de estudio en el cual se trabaja con dos biomásas: bagazo de trigo y sorgo por la tecnología de procesamiento de gasificación; se consideran cinco de los estados en los que existe mayor presencia, y estos mismos son sometidos a selección de ubicación de producción, además se consideran cinco mercados que actualmente requieren de compras internacionales de metanol, con el fin de abastecer sus demandas con metanol obtenido de fuentes renovables. En la Figura 1 se muestra la superestructura planteada.

La superestructura se ha modelado por medio de la programación disyuntiva generalizada (GDP), la cual a través de un planteamiento basada en la lógica proposicional permite encontrar la ruta óptima. La GDP requiere del planteamiento de disyunciones que indican la existencia o no de cada planta de

procesamiento. La ecuación 1 muestra que las materias primas son definidas como trigo (t) y sorgo (s), las ubicaciones de origen como j , las localizaciones de las plantas como k y los mercados como m . Los flujos de bagazo de trigo y sorgo que entran a la planta ubicada en k se definen como $FB_{s,k}, FB_{t,k}$ [t/y]; el precio de venta de las biomásas es C_{BS} y C_{BT} [USD/t]. El rendimiento del proceso de gasificación se define como n_G , el flujo de metanol obtenido en cada planta es $F_{MeOH,k}$ [t/y], el costo de venta de metanol es $CV_{MeOH,k}$ [USD/y] y el precio por tonelada es de PV_{MeOH} [USD/t]. Por otro lado, el costo de transporte de origen a planta es $C_{TOP,jk}$ [USD/y] y el costo de transporte de la planta al mercado es $C_{TPM,km}$ [USD/y], donde D_{jk}, D_{km} indican las distancias recorridas en km y C_{comb} el costo del combustible en USD, por último C_{Pr} [USD/t] el costo de producción. En la ecuación 2 se muestra la función objetivo siendo en este caso la ganancia, Gan [USD/y] definida por las variables ya mencionadas. Este modelo ha sido relajado mediante la metodología del cascarón convexo, permitiendo obtener un equivalente mixto-entero no lineal



(MINLP), el cual es codificado y resuelto en el software GAMS.

$$\left[\begin{array}{c} Y_k \\ F_{MeOH,k} = (FB_{s,k} + FB_{T,k}) * n_G \\ CV_{MeOH,k} = F_{MeOH,k} * PV_{MeOH} \\ C_{BT,k} = (FB_{s,k} * C_{BS}) + (FB_{T,k} * C_{BT}) \\ C_{TOP,jk} = \sum_k FB_{s,k} \cdot D_{jk} \cdot C_{comb} + \sum_k FB_{T,k} \cdot D_{jk} \cdot C_{comb} \\ C_{Pr} = A \end{array} \right] v \left[\begin{array}{c} \neg Y_k \\ F_{MeOH,k} = 0 \\ CV_{MeOH,k} = 0 \\ C_{BT,k} = 0 \\ C_{TOP,jk} = 0 \\ C_{Pr} = 0 \end{array} \right] \quad (1)$$

$$Gan = \sum_k (CV_{MeOH})_k - \sum_k (C_{Pr} * F_{MeOH})_k - \sum_k (C_{BT})_k - \sum_k (C_{TOP,jk}) - \sum_k (C_{TPM,km}) \quad (2)$$

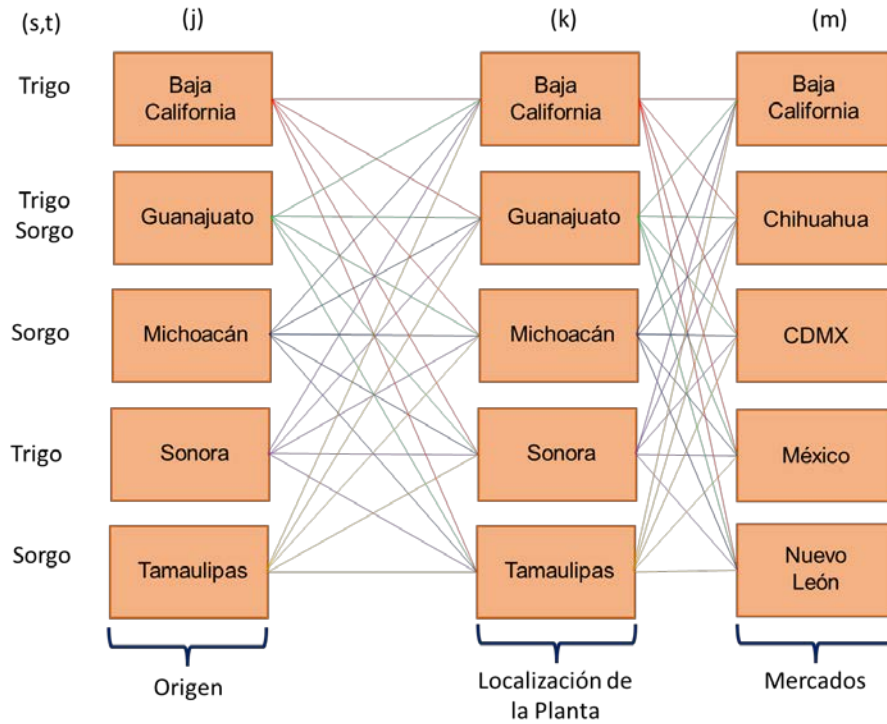


Figura 1. Superestructura de la cadena de suministro de metanol a partir de trigo y sorgo.

3. Resultados

En la Figura 2 se muestra la distribución de las materias primas con alto potencial de ser utilizadas para producción de

metanol en México; esta distribución permite identificar que tipo de materia prima es más factible utilizar por estado, la



cual es de utilidad tanto para metanol como para cualquier otro producto que

pueda obtenerse mediante residuos biomásicos o CO_2 .

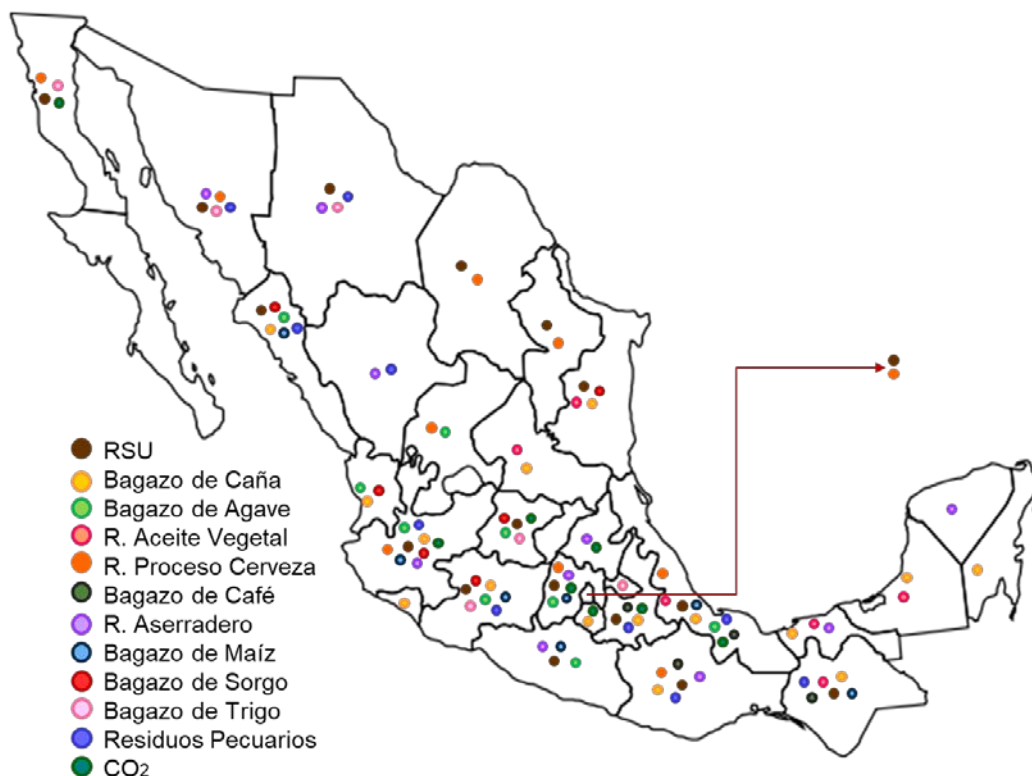


Figura 2. Distribución de los residuos de mayor disponibilidad en México.

Por otro lado, el modelo matemático obtenido de la relajación de la GDP está conformado por 88 ecuaciones y 131 variables, dando como resultado 43 grados de libertad; se solucionó empleando el resolvidor *Baron*, debido a que el modelo obtenido es de la categoría MINLP con el fin de determinar la ruta que garantiza la ganancia máxima. Este modelo cuenta con restricciones de la disponibilidad máxima anual que existe de bagazo de sorgo y trigo,

no cuenta con restricciones de la cantidad de producción máxima que se puede obtener debido a que parte de los objetivos es la determinación de este potencial máximo de producción. Los rendimientos de procesos, costos de producción y costos de biomásas son obtenidos de fuentes bibliográficas mostradas en la Tabla 2 y de SAGARPA.

La ruta obtenida indica el uso de ambos bagazos, siendo el bagazo de trigo el



seleccionado para abastecer los mercados del norte del país y el bagazo de sorgo para abastecer los mercados del centro del país. La ruta optima indica que es necesario colocar solo dos plantas de procesamiento, una que suministre metanol a dos mercados y la otra que suministre metanol a tres mercados.

Para este estudio se hace la consideración de que los bagazos utilizados para el procesamiento de gasificación llegan a la planta con poca cantidad de humedad y no se toma en cuenta la descomposición o daño en el material orgánico antes de ser procesado y como puede esto afectar la producción y rendimiento. Además de tener en claro que las materias primas utilizadas para el caso de estudio, así como el resto mencionadas en la Tabla 1, están basadas específicamente en residuos de segunda generación, esto con el fin de no generar ningún impacto negativo en la demanda alimenticia.

La ruta optima se muestra gráficamente en la Figura 2, la cual indica que el bagazo de sorgo extraído de Guanajuato y Michoacán será transportado y procesado en

Guanajuato para la obtención de metanol, el cual abastecerá los mercados de Nuevo León, CDMX y México. Por otro lado, el bagazo de trigo extraído de Sonora será procesado en ese mismo estado y el metanol obtenido será transportado a los mercados de Chihuahua y Baja California. La capacidad de producción de metanol para este caso de estudio es de 504,850.0 toneladas anuales, lo cual resulta en una cantidad mayor a los 162,442.4 toneladas que en 2021 tuvieron que comprarse al extranjero, permitiendo solo con estos dos tipos de residuos completar la demanda e incluso contar con una cantidad adicional que podría usarse en el país o exportarse. Por otro lado, para esta producción se obtuvo una ganancia de 5,651,900.00 USD anuales, para un total de dos plantas instaladas. Mostrando con esto el potencial existente en México de poder producir metanol, y teniendo en cuenta que para este caso de estudio solo se manejaron dos tipos de bagazos, el utilizar cualquier otro de los mencionados es factible siempre y cuando se maneje la tecnología de procesamiento adecuada.

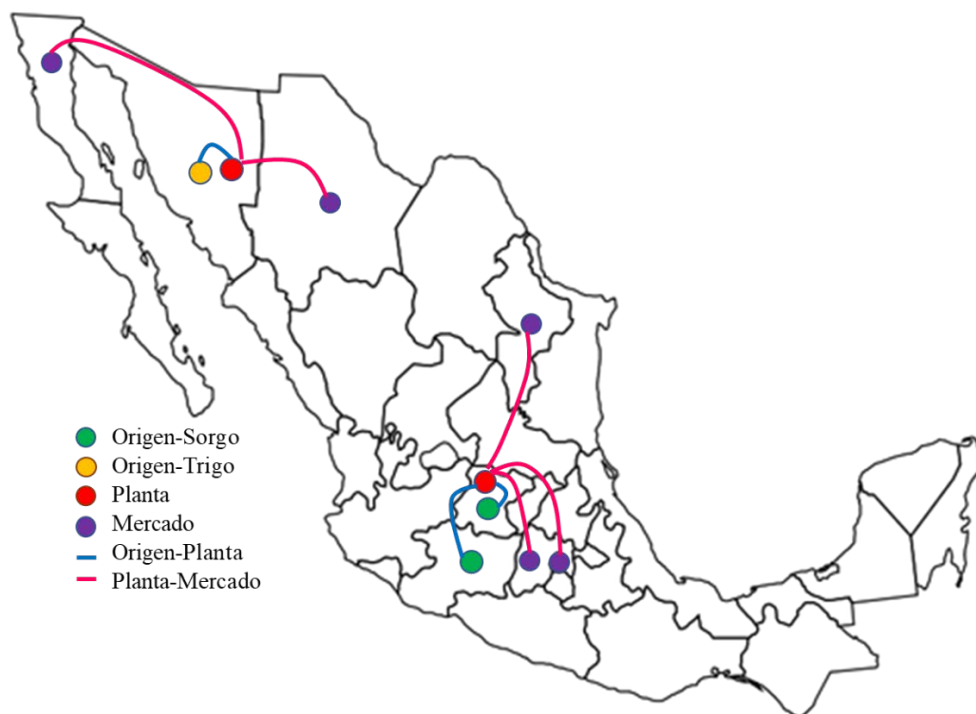


Figura 2. Ruta Optima de la cadena de suministro de Metanol.

4. Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis de los diversos tipos de residuos que pueden ser utilizados en México para la producción de metanol, encontrando una gran variedad, siendo 12 tipos distintos los catalogados con mejor disponibilidad anual, tanto para producir metanol como cualquier otro producto. Asimismo, se han identificado 4 tipos distintos de procesamiento que pueden ser aptos para la producción de metanol a partir de biomasa: gasificación, pirólisis, digestión anaerobia y síntesis a

partir de CO_2 . Cada tipo de procesamiento se usa acorde al tipo de residuo, ya que pueden presentar diversas características que hacen más viable uno sobre el otro. Para el caso de estudio desarrollado solo se seleccionó bagazo de trigo y sorgo realizando una optimización de la cadena de suministro, considerando 5 ubicaciones y 5 mercados, encontrando ganancias de 5,651,900.00 USD anuales para una producción de 504,850.0 toneladas, divididas en dos plantas ubicadas en Sonora y Guanajuato. Mostrando además



el gran potencial de las biomásas al mostrar que puede ser posible cubrir la demanda de metanol que se debe comprar al extranjero, e incluso el poder utilizar más tipos de residuos podrían generar cantidades suficientes para exportación.

Referencias Bibliográficas

Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO), (2012). Recuperado en enero de 2022 de <https://dgel.energia.gob.mx/anbio/>

Caloca Moreno, J., & Medina Estrada, R. (2016). Auditoria Financiera y de Cumplimiento: 16-6-90t9m-02-0476, Auditoria Superior de la Federación (ASF) de la Cámara de Diputados, 1-20. https://www.asf.gob.mx/Trans/Informes/IR2016b/Documentos/Auditorias/2016_0476_a.pdf

Climate Action Tracker (CAT). Recuperado el 22 de Septiembre de 2020 de <https://climateactiontracker.org/countries/mexico/>

Contreras- Zarazúa, G., Martín, M., Ponce-Ortega, J.M. & Segovia-Hernández, J.G. (2021). Sustainable Design of an Optimal Supply Chain. For Furfural production from agricultural

wastes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60, 14495-14510.

Espinoza-Vázquez, Y.M., Gómez-Castro, F.I. & Ponce-Ortega, J.M. (2021). Optimization of the supply chain for the production of biomass-based fuels and high-added value products in Mexico. *Computers & Chemical Engineering*, 107181

Harris, R. G. Grim, Z. Huang, & L. Tao, 2021, A comparative techno-economic analysis of renewable methanol synthesis from biomass and CO₂: Opportunities and barriers to commercialization, *Applied Energy*, 303, 117637.

Hernández, B., & Martín, M. (2016). Optimal Process Operation for Biogas Reforming to Methanol: Effects of Dry Reforming and Biogas Composition, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55, 6677-6685.

Kasmuri, N.H., Kamarudin, S.K., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., & Som, A, Md. (2017). Process system engineering aspect of bio-alcohol fuel production from biomass via pyrolysis: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 914-923.

Liu, Y., Li, G., Chen, Z., Shen, Y., Zhang, H., Wang, S., Qi, J., Wang, Y., & Cao, J.



(2020). Comprehensive analysis of environmental impacts and energy consumption of biomass-to-methanol and coal-to-methanol via life cycle assessment, *Energy*, 204, 1-9.

Martín, M., & Grossmann, I.E. (2017). Towards zero CO₂ emissions in the production of methanol from switchgrass. CO₂ to methanol, *Computers and Chemical Engineering*, 105, 308-316.

Patel, S.K.S., Gupta, R.K., Kalia, V.C., & Lee, J.K. (2021). Integrating anaerobic digestion of potato peels to methanol production by methanotrophs immobilized on banana leaves, *Bioresources Technology*, 323, 124550.

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. (2015). “Plan de mejora de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: Diagnóstico

Nacional”, Mapa de proyectos, manejo de residuos, Folio: 211PP64.

Secretaría de Economía, 2021, “Metanol: alcohol metílico”, Data Mexico, <https://datamexico.org>

Transparency Climate. (2020). “Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action and Responses to the Covid-19 Crisis”.

Yang, S., Li, B., Zheng, J., & Kankala, R.K. (2018). Biomass-to-Methanol by dual-stage entrained flow gasification: Design and techno-economic analysis based on system modeling, *Journal of Cleaner Production*, 205, 364-374.