

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5076

Hidrodesoxigenación catalítica: uso de compuestos derivados de biomasa para la generación de biocombustibles

Santiago José Guevara Martínez

sj.guemtzt.89@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5629-2864>

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

José Juan Alvarado Flores

jjalvarado@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5756-0960>

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, México

Manuel Arroyo Albiter

albitmanuel@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9510-5101>

Instituto de Investigaciones Químico Biológicas
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, México

Rebeca Escutia Gutiérrez

rebeca.pharmacy09@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6615-4251>

Centro Universitario de Ciencias de la Salud
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

José Luis Rico Cerda

jlceri@yahoo.com.mx

Posgrado de Ingeniería Química
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán, México

Correspondencia: sj.guemtzt.89@gmail.com

Artículo recibido 18 enero 2023 Aceptado para publicación: 18 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Guevara Martínez, S. J., Alvarado Flores, J. J., Arroyo Albiter, M., Escutia Gutiérrez, R., & Rico Cerda, J. L. (2023). Hidrodesoxigenación catalítica: uso de compuestos derivados de biomasa para la generación de biocombustibles. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9536-9548.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5076

RESUMEN

En este estudio se examinó la importancia del proceso de hidrodeshidrogenación (HDO), el cual nos permite obtener moléculas con el potencial calorífico necesario para ser útiles como biocombustibles, ejemplo de ello es la molécula de fenol, predominante en las mezclas remanentes de procesos de licuefacción celulósica. Se estandarizó el proceso utilizando catalizadores trimetálicos NiMoW soportados en Al_2O_3 el cual se basa en dos vías; la hidrogenación directa del anillo aromático, seguido de la escisión del enlace Csp³-O y la escisión directa por deshidrogenación del enlace Csp²-O de la molécula, ambas rutas se llevan a cabo simultáneamente generando como productos de reacción: moléculas como: benceno, ciclohexano, ciclohexeno, metilciclopentano, ciclohexanona y ciclohexanol. Este tipo de catalizadores presentan una conversión de hasta el 92% de moléculas oxigenadas como el fenol, mostrando propiedades texturales deseables (área superficial, distribución y tamaño de poro), lo cual permite una mayor interacción en la mezcla de reacción, favoreciendo la conversión, proporcionando una alternativa prometedora para procesos de purificación de moléculas oxigenadas que provee la naturaleza para la optimización de obtención de biocombustibles.

Palabras clave: hidrodeshidrogenación; bio-combustibles; biomasa; catalizadores trimetálicos.

Catalytic hydrotreating: use of biomass-derived compounds to generate biofuels

ABSTRACT

This study examined the importance of the hydrodeoxygenation (HDO) process, which allows us to obtain molecules with the necessary calorific potential to be useful as biofuels, an example of which is the phenol molecule, predominant in the mixtures remaining from cellulose liquefaction processes. The process was standardized using NiMoW trimetallic catalysts supported on Al_2O_3 which is based on two routes; the direct hydrogenation of the aromatic ring, followed by the cleavage of the Csp³-O bond and the direct cleavage by deoxygenation of the Csp²-O bond of the molecule, both routes are carried out simultaneously generating as reaction products: molecules such as: benzene, cyclohexane, cyclohexene, methylcyclopentane, cyclohexanone and cyclohexanol. This type of catalysts present conversions of up to 92% of oxygenated molecules such as phenol, showing desirable textural properties (surface area, distribution and pore size), which allows a greater interaction in the reaction mixture, favoring the conversion, providing a promising alternative for purification processes of oxygenated molecules provided by nature for the optimization of obtaining biofuels.

Keywords: *hydrodeoxygenation; biofuels; biomass; trimetallic catalysts.*

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento progresivo de combustibles fósiles es inevitable, esto ha impuesto a la ciencia nuevos retos para presentar alternativas graduales en la generación de novedosas fuentes de energía, ejemplo de ello es la inmensa gama de biocombustibles (Manojkumar et al., 2022) de diversas fuentes naturales que se han reportado en la última década (Xu et al., 2019). Los combustibles fósiles son utilizados diariamente en la producción de electricidad y en la propulsión de vehículos motorizados dependientes en un 95% del petróleo, casi la mitad del uso global (Stefanizzi et al., 2021). Lo anterior ha ocasionado que el transporte sea una fuente importante de contaminación atmosférica durante el siglo pasado, aunado a lo anterior, los motores de combustión interna continúan siendo un importante productor de emisiones tóxicas, conduciendo al aumento de subsecuentes efectos negativos sobre la salud humana (Hoang, A. T. 2021).

En el área científica se han utilizado catalizadores desde hace más de 2000 años, cuando hablamos de catálisis, nos referimos al proceso a través del cual se modifica la velocidad y trayectoria de una reacción química y donde el catalizador se convierte en parte del sistema de reacción (Faruque et al., 2020). En función de la naturaleza química del medio reaccionante, el número de fases presentes y de la química implicada, la catálisis se puede clasificar dos tipos: catálisis homogénea, la cual se refiere al proceso en el que el catalizador está en solución por lo menos con uno de los reactivos, es decir, el catalizador y el sistema reactivo forman una sola fase; por otro lado está la catálisis heterogénea, en ella interviene más de una fase, por lo regular el catalizador es un sólido y los reactivos y productos están en forma líquida o gas; ocurriendo la reacción catalítica en la interface fluido-sólido (Lawer-Yolar et al., 2021). Un catalizador es un material capaz de adsorber moléculas de reactivos en su superficie, consiguiendo mayor concentración, disminuyendo su energía de enlace y energía de activación. Los productos de reacción se desprenden del catalizador propiciando sitios activos libres para seguir reaccionando. Un catalizador, es una especie que no participa en la reacción y que adicionada al sistema en cantidades muy pequeñas cambia la rapidez de ésta; sin embargo, existen procesos de interacción entre el catalizador y los reactivos los cuales modifican las propiedades del mismo (Doğan, B., & Erol, D. 2019).

A nivel industrial el proceso de hidrotratamiento (HDT) es una etapa en la refinación del petróleo y ha sido parte fundamental para limpiar combustibles (Huang, W. et al., 2022)

eliminando los compuestos orgánicos de azufre (hidrodesulfuración, HDS), de nitrógeno (hidrodesnitrogenación, HDN) (Polo, E. P., Montes et al., 2022), de oxígeno (hidrodesoxigenación, HDO) y contenido de metales pesados (hidrodesmetalización HDM), optimizando metodologías y condiciones de reacción. Tradicionalmente, los catalizadores soportados en alúmina (Al_2O_3) dopados por especies reactivas de MoS_2 y WS_2 promovidas por Co o Ni se utilizan en procesos de HDT (Danilevich, V. V. et al., 2019). Sin embargo, con las modificaciones de la fase activa, el soporte y los cambios en el método de síntesis, se han desarrollado nuevos materiales catalíticos para aumentar la actividad de HDT en compuestos a base de oxígeno con el fin de satisfacer las limitaciones en los combustibles de transporte. Con esto en mente, se han reportado catalizadores trimetálicos NiMoW los cuales presentan hasta tres veces más actividad catalítica que los catalizadores utilizados tradicionalmente (Nadeina, K. A. et al., 2022).

2. NUEVAS FUENTES DE COMBUSTIBLES RENOVABLES

La demanda mundial de energía y, en particular, de los combustibles sigue creciendo día a día. El consumo global de energía en el año del 2007 fue de aproximadamente 12 billones de TEP (toneladas equivalentes de petróleo) e incremento hasta 13.3 billones de TEP para el 2015 (Retto Hernández, 2019). Con base esto, el consumo de petróleo aumentó de alrededor de 70 millones de barriles por día en 1995 (1 barril = 159 litros) a más de 90 millones barriles por día hasta finales del 2020. Adicionalmente y debido al agotamiento de los combustibles fósiles en un futuro cercano, la biomasa ha recibido una mayor atención en las últimas décadas, puesto que es una fuente renovable y sostenible para la fabricación de combustibles que sustituyan a los derivados del petróleo (Hansen, S. et al., 2020). La biomasa lignocelulósica se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina (Rodrigues, R. C. et al., 2022), que son redes poliméricas muy diferentes debido a su naturaleza química y también diferentes aceites que presentan. Se han reportado distintas metodologías para extracción y purificación de aceites biológicos una de las ampliamente reportadas es obtener por pirólisis rápida o por licuefacción (Kucharska, K. et al., 2020). La mayoría de los compuestos de la biomasa lignocelulósica contienen un alto contenido de oxígeno, lo cual es una problemática inminente para poder aprovechar el potencial de estas biomoléculas, en este punto es donde la HDO es una tarea importante en el procesamiento de estos materiales y generar biocombustibles de calidad (Unglert et al., 2020).

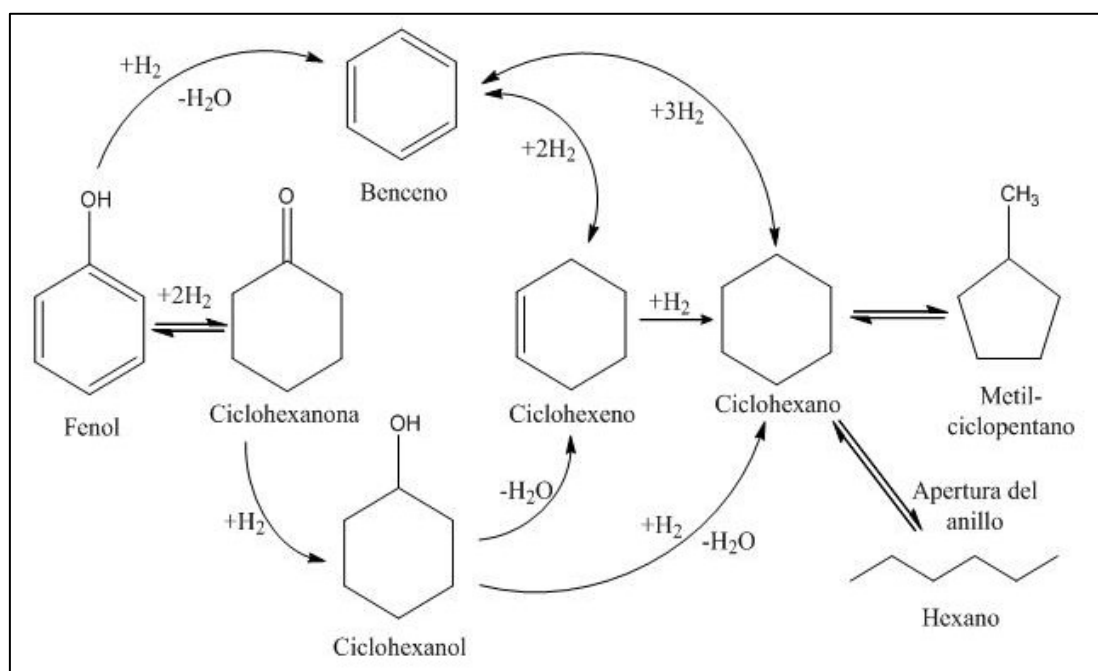
Una ventaja de la utilidad de los combustibles derivados de la biomasa, en comparación con los combustibles fósiles (Kim, S. et al., 2019), es que los primeros reducen las emisiones de gases de tipo invernadero como son el óxido de azufre. Sin embargo, el alto contenido de compuestos oxigenados disminuye el poder calorífico de los aceites de la biomasa, los cuales son inferiores comparados con los correspondientes de combustibles obtenidos del petróleo (He, Z. H. et al., 2020). Reducir los compuestos orgánicos oxigenados permite obtener biocombustibles valiosos provenientes de nuevas fuentes renovables. Las actuales regulaciones ambientales han creado la necesidad científica de transformar moléculas oxigenadas como el guayacol y el fenol presentes en la biomasa utilizando catalizadores activados para generar rupturas C-O de estas moléculas. El fenol, es una de las moléculas modelo para pruebas piloto de HDO, el cual se encuentra en porcentajes importantes en el procesamiento de la biomasa. Cabe señalar que la experiencia en el hidrotratamiento convencional del petróleo es punto de partida primordial para estipular metodologías y estandarizar condiciones de reacción (Templis, C. C. et al., 2019).

Los bio-aceites obtenidos de diversas fuentes de origen natural no son muy atractivos para aplicaciones como combustible directo (Maheswari et al., 2022), debido a ciertas propiedades como viscosidad alta, bajo poder calorífico, termoinestabilidad, porcentaje de sólidos y la tendencia de contaminación de superficie por carbonización. Lo anterior ha permitido plantear diversas estrategias para mejoramiento químico, reduciendo el contenido de oxígeno potencializando la conservación y formación de productos de calidad, así como proveerle la capacidad de combustible líquido.

La HDO se lleva a cabo a temperaturas moderadas, altas presiones de hidrógeno y en presencia de un catalizador heterogéneo (Resende, K. A. et al., 2019). Los aceites de pirólisis primaria a base de madera son mezclas complejas con grandes cantidades de agua, fragmentos de lignina, y una serie de moléculas que contienen oxígeno tales como aldehídos, ácidos carboxílicos, hidratos de carbono, fenoles, furfurales, alcoholes o cetonas (Tan, H. et al., 2022). La variedad de su composición complica el proceso, esto permite a los investigadores incursionar en esta rama para optimizar condiciones de reacción adecuadas para evitar la transformación y degradación de las moléculas altamente reactivas. El fenol y los derivados del furano representan la mayor resistencia a la conversión profunda durante la HDO (Bu, Q. et al., 2012), por esta razón que se ha

seleccionado como compuesto modelo para la evaluación de nuevos catalizadores y para obtener una mejor comprensión del mecanismo de reacción de la HDO se representa en la figura 1 la degradación de una molécula de fenol y los posibles derivados de la catálisis que se pueden llegar a obtener en dicho proceso (Wang, X. et al., 2020).

Figura 1. *Reacción de hidrodesoxigenación de una molécula de fenol catalizada por una corriente de hidrogenación continua.*

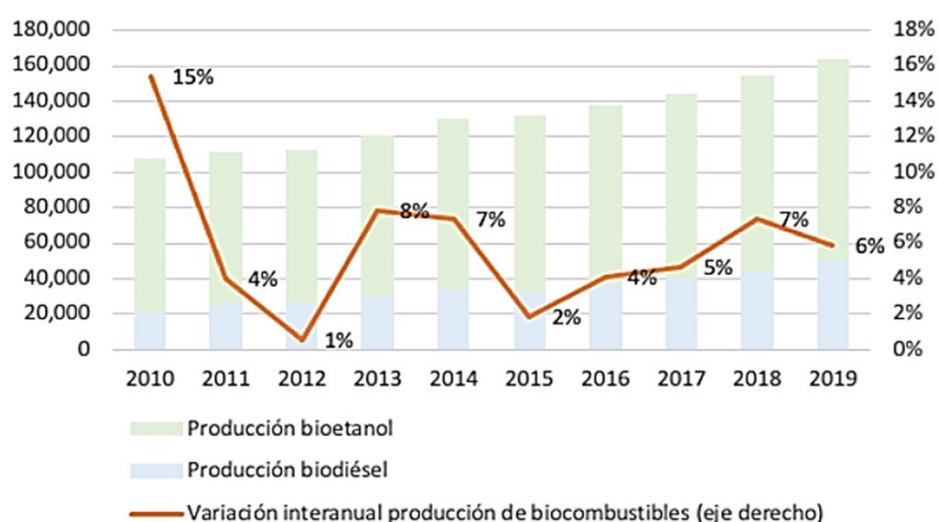


Actualmente los biocombustibles líquidos forman parte de una transición más limpia en el marco de un paradigma de movilidad basada en la combustión interna. Al tiempo que constituyen alternativas de movilidad ambientalmente más sostenibles que los combustibles de origen petroquímico, los biocombustibles permiten una movilidad más limpia sin grandes transformaciones técnicas. Con base en lo anterior, presentan interés por contribuir a diversificar la matriz energética y por generar un impacto positivo en el desarrollo territorial y la agricultura, a través de una demanda más estable de materias primas con un valor agregado, contribuyendo al control ambiental (Kucharska, K. et al., 2020).

La producción mundial de biocombustibles líquidos mostró un crecimiento acumulado del 53 % en la última década (2010-2019), generando una tasa de variación interanual oscilante durante ese período entre el 1 % y el 13 % (Alalwan, H. A. et al., 2019), con una tendencia acumulativa en la producción, lo cual para el 2019 llegó a 163 millones de

metros cúbicos, cifras alentadoras y a la vez preocupantes por la inminente demanda anual de materia prima solicitada para satisfacer los estándares industriales actuales (figura 2).

Figura 2. Variación porcentual, tendencia y producción total (en miles de m³) de biocombustibles líquidos en el mundo a nivel mundial.



*Fuente: tomada de la base de datos de Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) del 2020, la Oficina Europea de Estadística (EUROSTAT) datos del 2020-2021, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) datos del 2020-2022 y bases de datos nacionales del 2021.

3. ACTIVIDAD CATALÍTICA

Típicamente los catalizadores utilizados en los procesos de hidrotratamiento son los sulfuros de Mo o W promovidos por otros metales como el Co o Ni y soportados en alúmina, estos principalmente utilizados en la HDS de una gran variedad de compuestos sulfurados, presentes en los crudos del petróleo. Sin embargo, para el HDO la concentración de oxígeno en los compuestos derivados de la lignina es muy alta, reduciendo su poder calorífico y por tanto biocombustibles de baja calidad, esto se ha llevado a implementar nuevos materiales mediante cambios principalmente en la fase activa (Soled, S. 2015), modificación de los soportes y cambios de formulación (Popov, A. et al., 2013).

Con base en lo anterior, Soled y colaboradores a inicio del 2015 sintetizaron y patentaron un catalizador trimetalico a base de NiMoW no soportado, el cual presento una actividad catalítica excepcional para los catalizadores industriales de la época, sin embargo, presentan la desventaja de tener un costo elevado y poca utilidad de los componentes activos (Soled, S. 2015). Adicionalmente, diversos grupos de investigación han

incursionado en el desarrollo de materiales modificando los distintos tipos de soportes utilizados, entre los que destacan los óxidos de aluminio, óxidos de titanio y zeolitas. Estos óxidos pueden facilitar la reducción y sulfuración de las fases activas de Mo y W (Vasić et al., 2020); y por lo tanto ayudar en la formación de sitios activos de las especies de óxidos de Mo octaédricas; necesarias para una buena actividad en HDS, y se deduce que pueden presentar actividad catalítica semejante en la HDO.

Los catalizadores trimetálicos a base de níquel, molibdeno y tungsteno, soportados en óxido de aluminio (NiMoW/Al₂O₃) presenta una vida media útil muy buena en el seno de reacción de la HDO, prueba de ello es la actividad catalítica presentada durante la reacción con una selectividad de HYD/DDO = 1.4 lo cual indica que el catalizador prefiere la ruta de la hidrogenación para la HDO del fenol, generando un 92 % de conversión, esto indica que las moléculas oxigenadas procedentes de diversas fuentes de biomasa se activan para generar moléculas con mayor poder calorífico, lo cual se traduce como mayor energía.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio del proceso de la HDO de moléculas oxigenadas utilizando como catalizadores los sulfuros trimetálicos han presentado una favorable conversión en la HDS de algunos compuestos azufrados presentes en los combustibles fósiles, permite considerar que la actividad catalítica para compuestos oxigenados provenientes de la biomasa como es el caso de la molécula fenol, el cual es uno de los compuestos predominantes en los aceites ligno-celulósicos, genera rendimiento favorable en la purificación de este tipo de moléculas. En los últimos años, el encarecimiento de los recursos energéticos y el problema del cambio climático, han dado lugar a la búsqueda de fuentes de energía alternativas a las utilizadas tradicionalmente, esto ha dado pauta al estudio de la hidrodesoxigenación de moléculas oxigenadas como fuente primaria para producir derivados hidrocarbonados con un alto nivel calorífico que nos puedan proporcionar una energía útil y disminuir emisiones ambientales de tipo invernadero, como lo son los gases de combustión interna generados por combustibles derivados del petróleo.

Los biocombustibles no son la solución definitiva de los problemas energéticos, económicos y ambientales que padece el planeta. Pero prometen ser una fuente alternativa de energía, complementaria de las tradicionales existentes en el corto y en el mediano plazo, y con muchos rasgos promisorios cuando se proyecta a largo plazo, en el

que el gran paradigma de cómo evolucionarán los combustibles fósiles, que actualmente constituyen la base sobre la que se apoya la economía mundial vendrá dada por el correcto enfoque de las nuevas generaciones para innovar y sustentar sus necesidades energéticas. La biomasa, y en particular la biomasa lignocelulósica, es la materia prima esencial para la producción de biocombustibles renovables, por lo que es fundamental desarrollar y optimizar tecnologías innovadoras y sostenibles para su aprovechamiento integral en una biorrefinería que disminuya el alto contenido de contaminantes que hoy en día presenta nuestro planeta.

5. REFERENCIAS

- Alalwan, H. A., Alminshid, A. H., & Aljaafari, H. A. (2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*, 28, 127-139.
- Bu, Q., Lei, H., Zacher, A. H., Wang, L., Ren, S., Liang, J., ... & Ruan, R. (2012). A review of catalytic hydrodeoxygenation of lignin-derived phenols from biomass pyrolysis. *Bioresource technology*, 124, 470-477.
- Doğan, B., & Erol, D. (2019, October). The future of fossil and alternative fuels used in automotive industry. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-8). IEEE.
- Danilevich, V. V., Stolyarova, E. A., Vatutina, Y. V., Gerasimov, E. Y., Ushakov, V. A., Saiko, A. V., ... & Noskov, A. S. (2019). Optimizing the properties of an alumina support of hydrotreating catalysts by introducing boron and sulfur at the stage of obtaining pseudoboehmite by hydrothermal treatment of the product produced by flash calcination of gibbsite. *Catalysis in Industry*, 11, 301-312.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2020. Sitio web institucional (en línea). Washington, D. C., Estados Unidos de América. Disponible en <https://www.eia.gov/>.
- EUROSTAT (European Statistical Office, Luxemburgo). (2020). Shares (renewables) (en línea). Luxemburgo. Consultado 16 febrero del 2023. Disponible en <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>.
- Faruque, M. O., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2020). Application of heterogeneous catalysts for biodiesel production from microalgal oil—a review. *Catalysts*, 10(9), 1025.

- Kim, S., Kwon, E. E., Kim, Y. T., Jung, S., Kim, H. J., Huber, G. W., & Lee, J. (2019). Recent advances in hydrodeoxygenation of biomass-derived oxygenates over heterogeneous catalysts. *Green Chemistry*, 21(14), 3715-3743.
- Kucharska, K., Słupek, E., Cieśliński, H., & Kamiński, M. (2020). Advantageous conditions of saccharification of lignocellulosic biomass for biofuels generation via fermentation processes. *Chemical Papers*, 74, 1199-1209.
- Hansen, S., Mirkouei, A., & Diaz, L. A. (2020). A comprehensive state-of-technology review for upgrading bio-oil to renewable or blended hydrocarbon fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109548.
- He, Z. H., Jiang, C. S., Wang, Z. Y., Wang, K., Sun, Y. C., Yao, M. Q., ... & Liu, Z. T. (2020). Catalytic hydrodeoxygenation of biomass-derived oxygenates to bio-fuels over Co-based bimetallic catalysts. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(9), 4558-4569.
- Hoang, A. T. (2021). Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: A review. *Fuel Processing Technology*, 218, 106840.
- Huang, W., Zhou, Y., Wei, Q., Liu, X., Zhang, P., Xu, Z., ... & Yang, H. (2022). Synthesis of mesoporous TiO₂-Al₂O₃ composites supported NiW hydrotreating catalysts and their superior catalytic performance for heavy oil hydrodenitrogenation. *Fuel*, 319, 123802.
- Manojkumar, N., Muthukumaran, C., & Sharmila, G. (2022). A comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(3), 198-208.
- Nadeina, K. A., Budukva, S. V., Vatutina, Y. V., Mukhacheva, P. P., Gerasimov, E. Y., Pakharukova, V. P., ... & Noskov, A. S. (2022). Unsupported Ni—Mo—W Hydrotreating Catalyst: Influence of the Atomic Ratio of Active Metals on the HDS and HDN Activity. *Catalysts*, 12(12), 1671.
- Lawer-Yolar, G., Dawson-Andoh, B., & Atta-Obeng, E. (2021). Synthesis of biodiesel from tall oil fatty acids by homogeneous and heterogeneous catalysis. *Sustainable Chemistry*, 2(1), 206-221.
- Maheswari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Beg, M., ... & Jaiswal, A. K. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of

- feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 131588.
- Vasić, K., Hojnik Podrepšek, G., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2020). Biodiesel production using solid acid catalysts based on metal oxides. *Catalysts*, 10(2), 237.
- Polo, E. P., Montes, Y. J. M., & Candezano, M. A. C. (2022). Síntesis y caracterización de NiMo5W/Al₂O₃ modificado con ZnO para la hidrodeshidrogenación de Indol. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10(2), 147-161.
- Popov, A., Kondratieva, E., Mariey, L., Goupil, J. M., El Fallah, J., Gilson, J. P., ... & Maugé, F. (2013). Bio-oil hydrodeoxygenation: Adsorption of phenolic compounds on sulfided (Co) Mo catalysts. *Journal of Catalysis*, 297, 176-186.
- Retto Hernández, P. I. (2019). Potencial energético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos en el Perú.
- Resende, K. A., De Souza, P. M., Noronha, F. B., & Hori, C. E. (2019). Thermodynamic analysis of phenol hydrodeoxygenation reaction system in gas phase. *Renewable Energy*, 136, 365-372.
- Rodrigues, R. C., Rodrigues, B. G., Canettieri, E. V., Martinez, E. A., Palladino, F., Wisniewski Jr, A., & Rodrigues Jr, D. (2022). Comprehensive approach of methods for microstructural analysis and analytical tools in lignocellulosic biomass assessment—A Review. *Bioresource Technology*, 348, 126627.
- Soled, S. (2015). Silica-supported catalysts get a new breath of life. *Science*, 350(6265), 1171-1172.
- Stefanizzi, M., Capurso, T., Filomeno, G., Torresi, M., & Pascazio, G. (2021). Recent Combustion Strategies in Gas Turbines for Propulsion and Power Generation toward a Zero-Emissions Future: Fuels, Burners, and Combustion Techniques. *Energies*, 14(20), 6694.
- Tan, H., Rong, S., Zhao, R., Cui, H., Zhang, N. N., Chen, Z. N., ... & Zhang, F. (2022). Targeted conversion of model phenolics in pyrolysis bio-oils to arenes via hydrodeoxygenation over MoO_x/BaO@ SBA-15 catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 438, 135577.
- Templis, C. C., Revelas, C. J., Papastilianou, A. A., & Papayannakos, N. G. (2019). Phenol hydrodeoxygenation over a reduced and sulfided NiMo/γ-Al₂O₃ catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(16), 6278-6287.

- Unglert, M., Bockey, D., Bofinger, C., Buchholz, B., Fisch, G., Luther, R., ... & Krah, J. (2020). Action areas and the need for research in biofuels. *Fuel*, 268, 117227.
- Wang, X., Arai, M., Wu, Q., Zhang, C., & Zhao, F. (2020). Hydrodeoxygenation of lignin-derived phenolics—a review on the active sites of supported metal catalysts. *Green Chemistry*, 22(23), 8140-8168.
- Xu, C., Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Maham, M., Luque, R., & Puente-Santiago, A. R. (2019). Benign-by-design nature-inspired nanosystems in biofuels production and catalytic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 195-252.