

11. El futuro de la producción de combustibles fósiles y los petroquímicos

DOI: [cc.443.11](https://doi.org/10.44311)

HERIBERTO DÍAZ VELÁZQUEZ*

Resumen

Los compromisos medioambientales relacionados a la producción de combustibles hacen imperante que nuevas formas de propulsión sean desarrolladas en el futuro. Es por ello que en este capítulo se discuten los avances más recientes en materia de combustibles alternativos, tales como los biocombustibles y los combustibles sintéticos (e-fuels), considerados de baja intensidad de carbono, así como las tecnologías de cero emisiones, como los vehículos eléctricos. Estas alternativas forman parte de las estrategias que, a futuro, se perfilan como viables para la sustitución progresiva de los combustibles fósiles. La segunda parte del capítulo aborda los aspectos más relevantes de la industria petroquímica, con especial énfasis en los diferentes productos químicos y sus aplicaciones. Posteriormente, se discuten los aspectos fundamentales que prevalecerán como los pilares del desarrollo de la industria petroquímica del futuro, la cual, entre otras cosas, contempla la química C1 (gas de síntesis) como el eje central del desarrollo de la industria de los petroquímicos a largo plazo.

Palabras clave: *energías renovables, biocombustibles, industria petroquímica, cero emisiones.*

* Doctor en Ciencias. Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo, México. ORCID: 000-003-1233-6524; Scopus: 57194777349; correo electrónico: hdiaz@imp.mx

Introducción

Alcanzar el objetivo de 2 °C implica un presupuesto de carbono estricto de un máximo de 900 000 millones de toneladas de emisiones de CO₂ del sistema energético entre hoy y finales de siglo. Por lo tanto, una transición energética de 2 °C implicaría una reducción significativa del uso de combustibles fósiles, con diferentes trayectorias para el carbón, el petróleo y el gas. En este contexto, los combustibles fósiles deberían considerarse un recurso escaso y su uso debería concentrarse en aplicaciones de alto valor y con alternativas limitadas, especialmente en la industria (Edenhofer y Seyboth, 2013; Hannah, 2011).

Para 2050, se espera que el 80 % de la producción de energía a nivel mundial provenga de energías renovables de cero emisiones, es decir, del uso del gas y derivados del petróleo a sistemas energéticos limpios y sostenibles como la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, entre otras. A pesar de ello, en el caso del transporte, la gasolina continuará teniendo un papel primordial durante, al menos, los siguientes 25 años; sin embargo, la necesidad de contrarrestar los efectos climáticos de la concentración de CO₂ en la atmósfera harán imperativo el uso de tecnologías de propulsión libres de emisiones. Esto provocará un aumento en el consumo de vehículos impulsados por combustibles cero emisiones, como los propulsados con baterías de iones de litio (LIB, por sus siglas en inglés), de hidrógeno, amoníaco, o por aquellos que funcionan con combustibles de bajas, como bio-gasolina, biodiésel, bio-alcoholes que, en su conjunto, conforman los llamados biocombustibles (Cherwoo *et al.*, 2023; Malik *et al.*, 2024).

Por otro lado, la demanda de productos químicos subyace a la demanda de los servicios que prestan, como el sustento, la movilidad y el confort térmico. Estos servicios abarcan tanto las necesidades humanas universales como el deseo de la población mundial de mejorar su nivel de vida. Por ejemplo, los fertilizantes se utilizan para aumentar la absorción de nutrientes vitales por parte de las plantas, incrementando así el rendimiento agrícola y la fiabilidad de los cultivos. Los plásticos se utilizan en todo el sistema alimentario mundial para el transporte, la conservación y el consumo. Los envases de plástico, muchos de los cuales se utilizan para alimentos y, cada vez más, para bebidas, constituyen el mayor componente de la demanda de

plásticos de un solo uso, representando aproximadamente el 36 % a nivel mundial (Wishart, 1978).

A medida que las personas viven más y disfrutan de un mejor nivel de vida, es probable que consuman más de los productos antes mencionados. Además, facilitar un futuro más sostenible depende cada vez más de los productos del sector químico. Por ejemplo, la reducción del peso total de los vehículos, una estrategia para reducir el consumo de combustible, se ve respaldada por la integración de materiales plásticos. Los materiales de aislamiento modernos que reducen la demanda de calefacción y refrigeración en los edificios también tienen un fuerte componente químico. Como es de esperarse, los productos químicos tienen un impacto ambiental, tanto en su producción como después de su uso, donde muchos de ellos no son reciclados y terminan formando parte de los ecosistemas terrestres y marinos. Al depositarse en las vías fluviales, los plásticos, fertilizantes y otros productos causan daños a los ecosistemas marinos. Esta sección está dedicada a discutir los aspectos más sobresalientes relacionados a las fuentes alternativas a los combustibles fósiles, sus principales características y ventajas con relación a las fuentes petrolíferas. Por otro lado, se detallan los aspectos más sobresalientes de la industria petroquímica, los petroquímicos más importantes y los derivados de ellos, así como las perspectivas de esta vital industria en el futuro, en especial respecto a su potencial de desarrollo sostenible (Dey *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

Los combustibles alternativos

La creciente demanda energética de la sociedad moderna ha impulsado a los investigadores a explorar diversas alternativas para generar energía sin aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el sector del transporte terrestre, esto ha llevado a un cambio gradual hacia la electrificación de los sistemas de propulsión en sustitución de los motores de combustión interna (MCI). No obstante, ofrecer opciones para reducir los GEI procedentes de los MCI a corto y medio plazo seguirá siendo fundamental para cumplir los objetivos globales de emisiones mientras se produce la eliminación paulatina de los vehículos de combustión. Los combustibles bajos

en carbono (LCF, por sus siglas en inglés) pueden servir como alternativa si se logra la neutralidad o la compensación de carbono. Además, estos combustibles podrían servir como almacenamiento intermedio de energía para fuentes de energía renovables donde, posteriormente, podrían utilizarse para generar electricidad para cualquier aplicación o para vehículos eléctricos. Este sentido, los combustibles alternativos, como los biocombustibles o los combustibles sintéticos, requieren una producción sostenible que cumpla con las regulaciones para evitar daños a la biodiversidad y garantizar la reducción de GEI. Por ello, es importante analizar cómo los LCF pueden ofrecer ventajas en el consumo de combustible y la reducción de emisiones, dependiendo de las características del combustible y los procesos de combustión, lo que podría afectar el rendimiento y la escalabilidad de cada motor según el tipo de combustible (Ramadhas, 2016; Sandaka y Kumar, 2023).

Combustibles bajos en carbono

Considerando que el petróleo requiere millones de años para su formación, se clasifica como un recurso no renovable. Asimismo, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de la combustión de sus productos pueden permanecer en la atmósfera durante periodos prolongados, contribuyendo de manera significativa al cambio climático. Sin embargo, si se considera que los organismos vivos —constituidos por biomoléculas esenciales como carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, así como por biopolímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina— presentan ciclos de vida significativamente más cortos, es posible establecer una diferencia relevante. El carbono liberado durante la combustión de derivados de estos compuestos puede ser reabsorbido por organismos fotosintéticos en periodos relativamente breves, permitiendo su reincorporación en nuevas moléculas de biomasa y, en consecuencia, en combustibles. Bajo este enfoque, los combustibles derivados de biomasa (biocombustibles) pueden considerarse de naturaleza renovable; no obstante, su balance de carbono difícilmente alcanza la neutralidad, es decir, emisiones netas cero. De este modo, podemos clasificar a los biocombustibles como combustibles bajos en carbono.

En las siguientes líneas se profundizará en la clasificación, producción, propiedades y aplicaciones de los biocombustibles (Benajes *et al.*, 2024; Jin *et al.*, 2023; Ullah *et al.*, 2016).

Los biocombustibles

Esencialmente, se conoce a los biocombustibles como aquellas fuentes de carburante obtenido de la biomasa (materia orgánica de origen, ya sea vegetal o animal, o de su transformación), residuos orgánicos y plantas.

Los biocombustibles se clasifican en combustibles primarios y secundarios. Los combustibles primarios incluyen, por ejemplo, la leña, el carbón vegetal, desechos agrícolas, o el bagazo de caña de azúcar. También incluyen la grasa de ballena, que se utilizaba para iluminar en la antigüedad, y los secundarios abarcan aquellos obtenidos de fuentes como el petróleo, gas natural y carbón, mediante procesos de refinación (Cherwoo *et al.*, 2023). Los biocombustibles también se clasifican en diferentes generaciones según la fuente de materia prima utilizada para su producción.

Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de cultivos alimentarios como el maíz, la caña de azúcar, la colza, etc. Estos participan en la producción de bioetanol o biobutanol mediante la fermentación del almidón o los azúcares obtenidos de cultivos alimentarios, y en la producción de biodiésel mediante la transesterificación de oleaginosas (Sadaqat *et al.*, 2025). El principal problema de los biocombustibles de primera generación es la relación entre alimento y combustible. El análisis del ciclo de vida (ACV) de los biocombustibles de primera generación reveló que, en la mayoría de los casos, hay una ganancia energética negativa (Gnansounou *et al.*, 2009).

Los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de cultivos no alimentarios, como la biomasa lignocelulósica. El ACV de los biocombustibles de segunda generación reveló que hay un aumento en la ganancia energética neta. Esto demuestra las ventajas de los biocombustibles de segunda generación sobre los de primera generación (Pramanik *et al.*, 2023).

Los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de algas. Las microalgas constituyen una fuente potencial para la producción de biocombustibles debido a su alto contenido lipídico, su capacidad de fijación de CO_2 y su rápido crecimiento. Los biocombustibles de tercera generación incluyen el bioetanol de microalgas y algas marinas, el biodiésel de microalgas y el biohidrógeno de microalgas y otros microorganismos. Estos biocombustibles superan las limitaciones e inconvenientes de los biocombustibles de primera y segunda generación (Debnath y Das, 2022). Otras ventajas incluyen la acumulación de grandes cantidades de lípidos neutros, la alta productividad, el secuestro de CO_2 y la biorremediación de aguas residuales (Dahman *et al.*, 2019).

El último, aunque no menos importante tipo de biocombustibles son los de cuarta generación, y son aquellos cuya materia prima para el biocombustible se obtiene mediante la modificación genética de la biomasa, especialmente con microalgas y otros microorganismos como levaduras, hongos y cianobacterias (Abdullah *et al.*, 2019). Los cultivos dedicados a la captura de CO_2 y los residuos urbanos también se incluyen en esta categoría. Los biocombustibles de cuarta generación representan un avance tecnológico gracias a la facilidad de procesamiento de materias primas para producir biocombustibles líquidos. La principal innovación de esta tecnología reside en el uso de biomasa modificada genéticamente, que contiene un porcentaje reducido de lignina y celulosa. Esta innovación permite la producción de una mayor cantidad de energía y la captura y almacenamiento de una cantidad más sustancial de CO_2 . Si bien los biocombustibles de cuarta generación aún se encuentran en una fase de desarrollo experimental y prolongada debido a la complejidad de las tecnologías involucradas y a los aspectos de escalabilidad y viabilidad económica, también representan una vía prometedora para el futuro de la energía sostenible con un menor impacto ambiental y un gran potencial de aplicación.

Otras fuentes de biomasa incluyen los residuos sólidos urbanos (RSU), que están compuestos por residuos de alimentos, papel, plásticos, recortes de jardín, caucho, textiles, madera, vidrio y otros materiales, los cuales varían según las condiciones locales, el clima y los hábitos alimentarios. Estos tienen un potencial significativo como materia prima para la producción de biocombustibles, ofreciendo una solución innovadora tanto para la gestión

de residuos como para los desafíos de las energías renovables. La parte biodegradable de los RSU puede convertirse en biocombustibles mediante procesos bioquímicos y termoquímicos. Sin embargo, es necesario un pretratamiento y una separación eficaces de los residuos plásticos antes de la conversión. Tecnologías como la digestión anaeróbica y la fermentación permiten la producción de biogás y bioetanol, mientras que procesos como el de pirólisis y la gasificación convierten los residuos en biocombustibles y combustibles sintéticos.

El uso de RSU para la producción de biocombustibles no sólo reduce los residuos en vertederos, sino que también mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero al evitar la descomposición de materiales orgánicos. Estudios recientes destacan avances en las técnicas de clasificación y preprocesamiento de residuos, lo que mejora la eficiencia y la viabilidad económica de la recuperación de biocombustibles a partir de residuos municipales (Ali Ijaz Malik *et al.*, 2024). Además, la integración de los RSU en los sistemas bioenergéticos impulsa las iniciativas de economía circular al reutilizar los materiales desechados para convertirlos en valiosas fuentes de energía.

Si bien persisten desafíos como la contaminación de los residuos y la variabilidad de las materias primas, los avances en las tecnologías de conversión de residuos en biocombustibles siguen mejorando la viabilidad y la sostenibilidad de los RSU como un factor clave para el sector bioenergético. La tabla 11.1 muestra las diferentes muestras de biomasa, el tipo de biocombustible que genera y la producción anual.

Tabla 11.1. Fuentes de biomasa y biocombustibles que la originan

<i>Fuente de biomasa</i>	<i>Biocombustible que produce</i>	<i>Producción anual (L/año)</i>	<i>Referencia</i>
Biomasa lignocelulósica	Bioetanol, biodiésel, SAF	130 000-150 000	(Kalak, 2023)
Residuo sólido municipal	Biodiésel, combustible sintético, SAF	5 000-15 000	(Vasileiadou, 2024)
Residuos industriales	Bioetanol, bio-crudo, biocombustibles avanzados	3 000-10 000	(Kalak, 2023)
Aguas residuales y residuos animales	Biometano, biodiésel	2 000-7 000	(Hasan y Ratnam, 2022)

Cultivos agrícolas y forestales	Bioetanol, biodiésel, SAF	720 000-740 000	(Kalak, 2023)
Algas	Biodiésel, bio-aceites	9 500-20 000	(Dalmas Neto <i>et al.</i> , 2014)

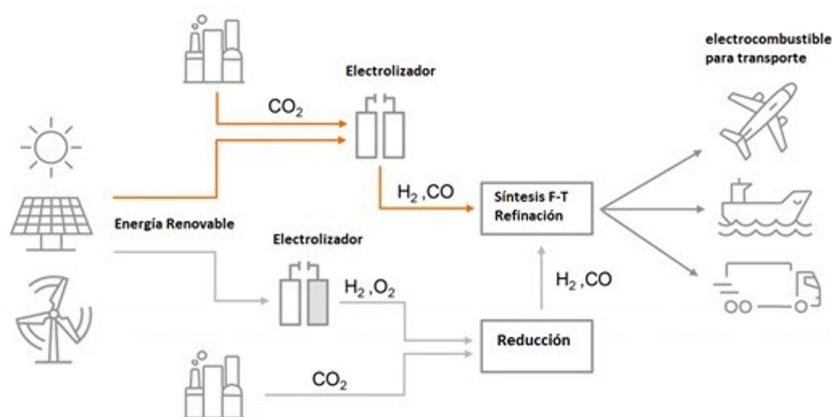
Fuente: elaboración propia.

Los combustibles eléctricos

Los electrocombustibles (e-combustibles, e-fuels, power to X, o PtX), también conocidos como combustibles sintéticos, se refieren a una amplia gama de combustibles bajos en carbono sintetizados a partir de sus componentes químicos (como hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂) que utilizan energía limpia en lugar de combustibles fósiles o procesos tradicionales de refinación de petróleo. Los e-combustibles pueden adoptar diversas formas, incluyendo opciones gaseosas, como el e-metano o el gas natural sintético, lo que se conoce como conversión de energía en gas, y combustibles sintéticos líquidos, como el e-metanol, el e-diésel o el e-que-roseno (conversión de energía en líquido). Derivados de fuentes de energía limpia como las renovables, los e-combustibles se consideran portadores de energía, al igual que el hidrógeno. Por consiguiente, también pueden servir como soluciones de almacenamiento de energía.

Si bien el hidrógeno a veces se considera un e-combustible, las opciones tecnológicas existentes para motores a combustión hacen mayor referencia a los combustibles sintéticos líquidos como opciones de sustitución de los combustibles fósiles. En la figura 11.1, ubicada en la siguiente página, se presenta un esquema de la producción de e-combustibles para transporte, en el cual el CO₂ se utiliza como fuente de carbono, mientras que el hidrógeno se obtiene mediante la electrólisis del agua. El CO₂ puede ser reducido ya sea en un electrolizador o mediante su reacción con H₂ para producir CO. Este, al mezclarse con hidrógeno, forma gas de síntesis (syngas), el cual, bajo proporciones adecuadas y en presencia de un catalizador, puede transformarse mediante la reacción de Fischer–Tropsch (F–T) en una amplia gama de hidrocarburos, que incluyen desde gasolinas automotrices hasta combustibles de aviación y diésel.

Figura 11.1. Producción de electro-combustibles para el transporte
(CPOX: oxidación parcial/RWGS: reacción de recambio agua-gas inversa)



Fuente: Modificado de <https://www.e-fuel.fi/about/>.

La producción de e-combustibles implica diversas tecnologías y consta de dos etapas principales: producción de materia prima y producción de combustible.

Producción de materia prima: los componentes químicos de los e-combustibles (agua, H_2 , CO_2 , N_2) pueden producirse con bajas emisiones de carbono a partir de diversas fuentes. Los métodos de producción de hidrógeno limpio se pueden abordar en la literatura correspondiente (Dash *et al.*, 2023; Ishaq *et al.*, 2022; Megía *et al.*, 2021), pero, entre ellos, se puede mencionar al hidrógeno verde, es decir, el producido a partir de la electrólisis del agua como uno de los más prometedores a futuro en términos de sustentabilidad. El CO_2 puede obtenerse de gases residuales industriales, fuentes biogénicas (como biorrefinerías o digestores), capturarse de fuentes puntuales mediante captura de carbono o del aire ambiente mediante captura directa de aire (DAC). El N_2 puede separarse del aire mediante diversas tecnologías y métodos de separación.

Producción de combustible: una vez que estas materias primas o componentes básicos se encuentran disponibles, se pueden utilizar métodos electroquímicos, termoquímicos o biológicos para producir gas de síntesis (una mezcla de monóxido de carbono CO e H_2) o electro-combustibles de

orden superior. Este gas de síntesis, a partir de procesos catalizados, puede convertirse en combustibles, pero también en gases como metano, metanol, etanol o etileno, los cuales constituyen materias primera para la producción de muchos compuestos de uso cotidiano o que pueden ser usados como combustibles en sí mismos, contribuyendo a la descarbonización del sector químico (Choi *et al.*, 2017; Jahangiri *et al.*, 2014).

Ventajas de los e-combustibles

Los e-combustibles son opciones versátiles y flexibles de combustible que pueden contribuir a satisfacer las necesidades energéticas locales y específicas del sector transporte. Los e-combustibles representan una excelente opción de reemplazo bajos en carbono para sectores difíciles de electrificar, especialmente en sectores y escenarios donde la rápida adopción de modos de transporte de cero emisiones podría no ser viable a mediados de siglo (como la aviación, el transporte pesado y el transporte marítimo). Muchos destacan la crucial necesidad de los combustibles sintéticos como herramienta clave en la transición energética.

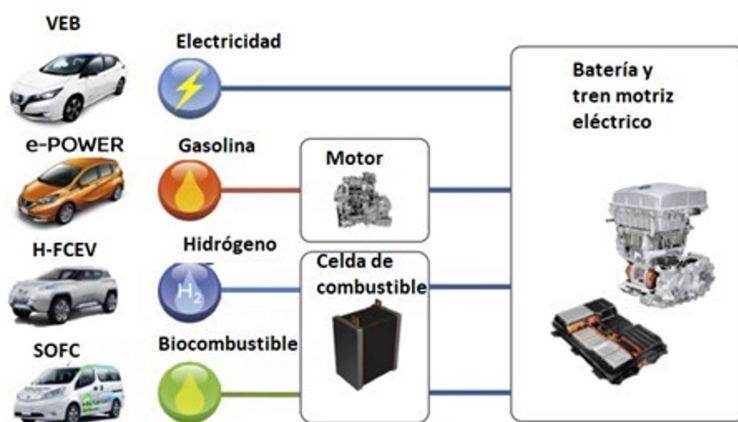
Los e-combustibles ofrecen beneficios similares a los de los productos derivados del petróleo; pueden transportarse y almacenarse fácilmente a largas distancias mediante la infraestructura existente. Esto contrasta con los desafíos de infraestructura que supone el transporte de hidrógeno, las pérdidas de energía asociadas a la transmisión de electricidad y las costosas tecnologías de almacenamiento en baterías, permitiendo obtener beneficios en materia de seguridad energética (Dell'Aversano *et al.*, 2024; Boretti, 2024).

Los e-combustibles pueden mejorar la calidad del aire local, ya que no contienen azufre ni hidrocarburos aromáticos, en comparación con los combustibles derivados del petróleo. Diversos estudios indican una disminución de contaminantes nocivos no relacionados con el carbono, como óxidos de azufre y emisiones de material particulado, gracias a la adopción de combustibles de aviación sostenibles. Por otro lado, este tipo de combustibles contribuyen al mercado y a las fuentes de ingresos mediante la valorización del CO₂ de la captura de carbono, tecnologías esenciales para la mitigación del cambio climático. Además, pueden aprovechar el exceso de calor de la energía nuclear

y el exceso de energía de fuentes renovables, diversificando eficazmente las fuentes de ingresos para las instalaciones generadoras (Boretti, 2024; Dybiński *et al.*, 2025).

Es cierto que al energizar a los automóviles con combustibles sintéticos no se evitan las emisiones de gases de efecto invernadero, pero estas son mucho menores que con el uso de gasolina y diésel de origen fósil. Según la Unión de Automovilistas Alemanes (ADAC), las emisiones de gases (óxido nítrico y dióxido de carbono) disminuyeron un 39 % con el uso de combustibles sintéticos. Este hecho permitirá que los motores de combustión interna sigan funcionando, lo cual será fundamental para millones de propietarios de este tipo de vehículos. Un escenario ambiental ideal sería emplear energía verde directamente en los automóviles sin pasar por el motor de combustión interna, evitando así el uso de combustible líquido o gaseoso. Por ello, la presencia de celdas fotovoltaicas en los automóviles podría ser una opción viable y muy ecológica (Dybiński *et al.*, 2025; Singh *et al.*, 2022). En la figura 11.2 se muestra un ejemplo de la tecnología e-power technology^{*} de Nissan para los vehículos de baja emisión (A Hybrid That Feels More like an EV?, 2024).

Figura 11.2. Tecnología e-power^{*} de Nissan para vehículos bajos en carbono



Fuente: imagen de internet (acceso libre). <https://autobuzzmy/2024/08/28/a-hybrid-that-feels-more-like-an-ev-nissans-e-power-technology-explained/> (A Hybrid That Feels More like an EV?, 2024).

Combustibles cero emisiones

Vehículos eléctricos

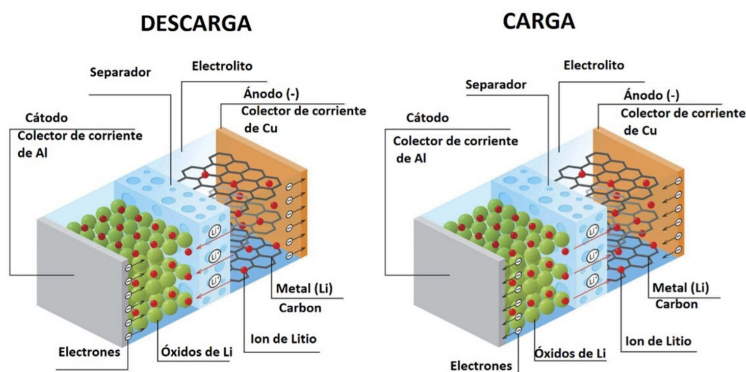
Un vehículo eléctrico es, como el nombre lo indica, cualquier vehículo para cuyo funcionamiento se utiliza una fuente de electricidad en lugar de un motor a combustión. Estos se alimentan de baterías que pueden cargarse desde una fuente externa.

La adopción de vehículos eléctricos (VE) supone un paso significativo hacia la reducción del impacto ambiental. A diferencia de los vehículos con motores de combustión interna, los vehículos eléctricos de batería (VEB) no emiten contaminantes atmosféricos directos durante su funcionamiento. Sin embargo, el rendimiento ambiental de los VEB, así como el de los vehículos de pila de combustible (VFC) y los vehículos eléctricos híbridos enchufables (VEPH), puede ser incluso inferior al de los vehículos modernos de combustibles fósiles debido a las importantes emisiones que se derivan de los procesos de producción de todas las partes que conforman tanto baterías como el vehículo mismo (Zentani *et al.*, 2024). El rendimiento de los VE también depende del tipo y la magnitud de conducción, región, y de las fuentes de electricidad utilizadas. A pesar de sus posibles inconvenientes, los VE, combinados con fuentes de electricidad bajas en carbono, como los biocombustibles y el gas natural, son más sostenibles desde el punto de ciclo de vida (Olabi *et al.*, 2022). Para comprender mejor el impacto ambiental de los futuros vehículos eléctricos de batería, las bases de datos sobre el ciclo de vida deben incluir datos sobre la fase de producción y las fuentes de energía utilizadas.

Investigaciones recientes indican que el impacto ambiental de los VE se ve fuertemente afectado por el tamaño de la batería y los requisitos energéticos (Olabi *et al.*, 2022). Los combustibles alternativos, como el bioetanol, el biodiésel, el biometanol, el biogás y la energía solar, podrían ser opciones viables para el futuro. Una opción que ha tomado mucha popularidad es el de los vehículos híbridos, los cuales tienen como fuentes de propulsión tanto un motor a gasolina y un motor eléctrico, y se consideran de bajas emisiones. Dichas emisiones serían prácticamente

neutralizadas si la gasolina de petróleo que actualmente se usa se sustituyera por bio-gasolina o gasolina sintética, reduciendo aún más el impacto ambiental de estas unidades (Delso-Vicente *et al.*, 2025). Por ello, es crucial incluir los desarrollos futuros del sector eléctrico en las bases de datos de antecedentes del ciclo de vida para comprender mejor el impacto ambiental de los vehículos eléctricos de batería (VEB). Además, también deben tenerse en cuenta la fase de producción y las fuentes de energía utilizadas para su fabricación, ya que los VEB son más sensibles a los cambios en el sector energético que los vehículos de combustión tradicionales. En la figura 11.3 se muestra la imagen de una típica batería de Li para un vehículo terrestre.

Figura 11.3. Representación de una celda de combustibles de litio



Fuente: Imagen tomada de internet (acceso libre). Modificado de <https://www.linkedin.com/pulse/working-principle-structure-lithium-ion-battery-davide-laverga/>.

Retos de los combustibles fósiles en la transición hacia energías de baja emisión de carbono

Hasta la actualidad, el transporte en prácticamente todos los sectores depende casi en su totalidad (>98 %) de motores de combustión interna, alimentados principalmente por combustibles fósiles de base líquida. Tanto el sector privado como los gobiernos impulsan de manera continua la adopción de

combustibles derivados de la biomasa, así como la transición en la propulsión del transporte terrestre hacia tecnologías más limpias, tales como vehículos híbridos (gasolina/eléctrico), vehículos totalmente eléctricos y sistemas basados en celdas de combustible alimentadas con hidrógeno renovable (Romm, 2006). No obstante, los motores de combustión interna aún enfrentan diversos desafíos, los cuales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Combustibles personalizados para motores con sistemas avanzados de ciclo de combustión que incrementen la conversión total de la energía química del combustible en energía mecánica. Estos avances en la ingeniería de motores tendrían como repercusión la reducción en el consumo total del combustible por kilometraje, dando como resultado una menor emisión de GHGs a la atmósfera. Un ejemplo en el corto plazo es el motor de encendido por compresión de gasolina (GCI por sus siglas en inglés), el cual podría usar gasolinas de bajo octanaje que son encendidas por compresión para alcanzar eficiencias como las del diésel.
- Emparejar los combustibles renovables que son químicamente convertidos como equivalentes de gasolina en los motores de combustión. Emparejar los combustibles y los motores es esencial para garantizar su conveniencia para los propósitos del usuario final y maximizar la eficiencia del motor. Por ello, es posible que se requiera de una optimización adicional conjunta de motores y combustibles.
- Usar combustibles que optimicen las complejas interacciones de sus propiedades físicas y químicas. La generación de energía en una cámara de combustión involucra un proceso de interacciones físicas y químicas, tales como la evaporación de los multicomponentes del combustible en un aspersor, la turbulencia en la carga, (auto)ignición de la mezcla combustible/aire, las velocidades de combustión, el movimiento del pistón y la formación de contaminantes. Todos estos dependen de las condiciones específicas de operación, lo cual, a su vez, depende del tiempo y se encuentran entrelazados en acoplamientos fisicoquímicos. Debido a ello, existen algunas propiedades que se prefieren en un conjunto de condiciones de operación y ambientales. Un combustible acondicionado a dichas condiciones sería preferido sobre otros combustibles, del tal modo que los sistemas de combustión que incluyan tanto un motor como un

combustible optimizado para operar en una o dos condiciones podrían tener ventajas sobre otros.

- Obtener combustibles de aviación con requerimientos más estrictos y características específicas para maximizar la eficiencia de la combustión. Los cambios en el diseño y la composición del motor deben satisfacer la necesidad de mantener la aeronave en vuelo. Por ejemplo, motores avanzados a turbina de ciclo de gas podrían requerir un límite superior de cetano (CN) para evitar la preignición en diseños de inyección inclinada, y quizá un límite más bajo para evitar eventos explosivos prematuros. Respecto a la concentración de compuestos aromáticos, no hay un límite bajo para combustibles de petróleo, a pesar de ello, las mezclas deben tener concentraciones de aromáticos de entre el 8 y el 25% para asegurar el hinchamiento de sellos. Si el límite de aromáticos se reduce y la relación H/C se incrementa, esto resultaría en una menor emisión de material particulado (PM), smog, y una creciente liberación de calor. Además, la estabilidad térmica del combustible incrementaría la habilidad de recuperar más energía de éste, así como la eficiencia del ciclo, disminuyendo los costos de mantenimiento y operación.

Panorama de la industria de los petroquímicos

Mientras que las refinerías más simples suelen limitarse a la destilación atmosférica y al vacío, las refinerías integradas incorporan fraccionamiento, conversión, tratamiento y mezcla con lubricantes, combustibles pesados y fabricación de asfalto; también pueden incluir procesamiento petroquímico. Además de la destilación, también están disponibles los gases que se producen en los diversos procesos de craqueo térmico. Tanto los procesos de craqueo catalítico como los térmicos dan lugar a la formación de hidrocarburos insaturados, en particular de etileno (C_2H_4) y propileno (propeno, C_3H_6) o butenos con sus diferentes isómeros (C_4H_8), así como diolefinas como el butadieno (C_4H_6), pero también cantidades pequeñas de hidrocarburos saturados como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butanos (C_4H_{10}) y metano (CH_4). Por otro lado, el hidrógeno (H_2) es otro subproducto importante en algunos procesos de refinación. No todas las parafinas y olefinas son

obtenidas en el mismo proceso, por ejemplo, parafinas como el etano, el propano y el butano son obtenidas a partir del craqueo de nafta, en tanto que sus contrapartes olefínicas (excepto el butadieno) son obtenidas de los procesos de deshidrogenación de dichos compuestos (Speight, 2006; Sukanuma y Katada, 2020).

Por otro lado, otro grupo importante de petroquímicos es el de los llamados BTX (benceno, tolueno y xileno), los cuales, a la par del butadieno, son normalmente obtenidos como productos de craqueo de naftas (Speight, 2006). Para su análisis, los petroquímicos son usualmente divididos en dos subcategorías: los petroquímicos primarios y los intermediarios y derivados. Los primarios incluyen todos los compuestos anteriormente mencionados, además de metanol, mientras que los compuestos intermediarios y derivados se pueden elaborar mediante distintos procesos, por ejemplo, ya sea manera directa a partir de los petroquímicos primarios, por intermediarios que contienen heteroátomos (oxígeno, cloro o nitrógeno) o por intermediarios que no los contienen. En todo caso, estos productos pueden considerarse productos terminados.

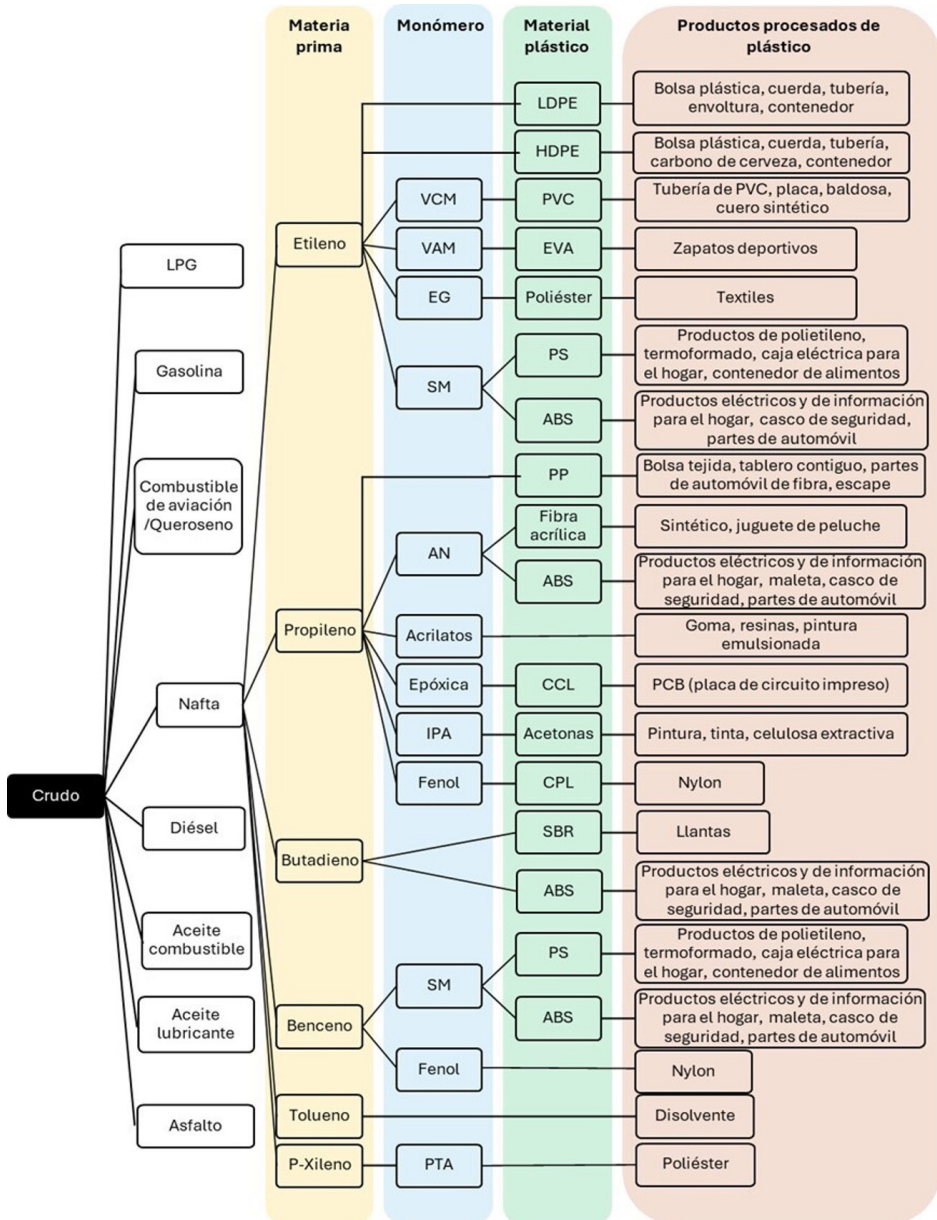
En la figura 11.4 se pueden observar, de modo general, algunas de las aplicaciones de los diferentes petroquímicos originados de modo primigenio desde la nafta, obtenida, a su vez, por los diferentes procesos de refinación de petróleo.

Olefinas, parafinas y sus derivados

Las olefinas (C_2H_{2n}) son componentes básicos en muchas síntesis químicas. Estos materiales insaturados se incorporan a polímeros y cauchos, y reaccionan con otros reactivos para formar una amplia variedad de compuestos útiles, como alcoholes, epóxidos, aminas y haluros.

Posiblemente, el producto petroquímico más importantes es el etileno, el cual se deriva del etano extraído del gas natural, como materia prima predominante para las unidades de craqueo de etileno. El etileno tiene un sinnúmero de aplicaciones como materia prima, por ejemplo, para producir polímeros a partir de su polimerización o copolimerización con otros monómeros, o como reactivo para la producción de diferentes productos químicos, desde disolventes, intermediarios reactivos, combustibles, plásticos, etc.

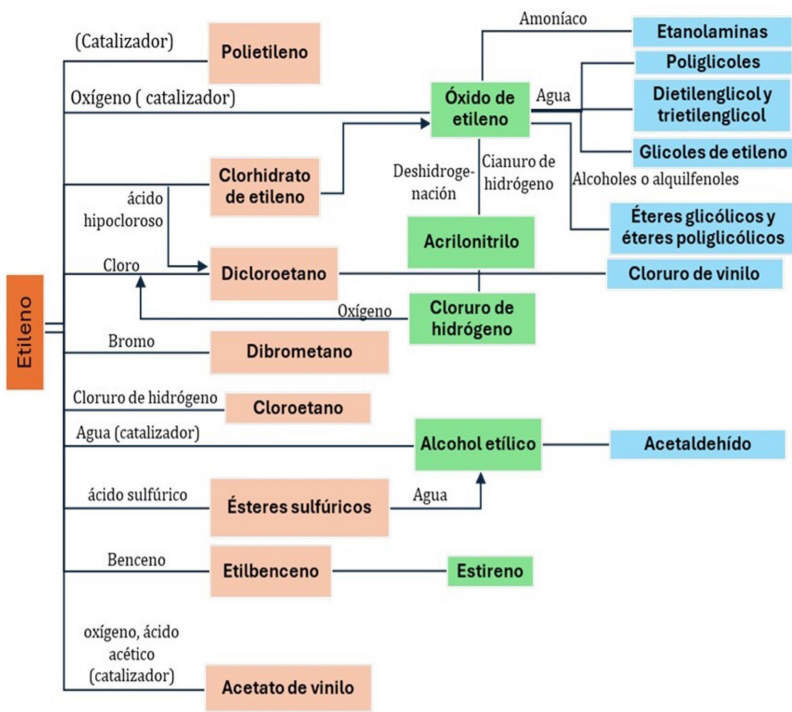
Figura 11.4. Productos petroquímicos seleccionados y sus aplicaciones



Fuente: elaboración propia.

Por mencionar algunas de las aplicaciones, los productos generados a partir del etileno incluyen artículos como plásticos, jabones y detergentes, solventes, medicamentos, fertilizantes, pesticidas, explosivos, fibras sintéticas y cauchos, pinturas, resinas epoxi y materiales para pisos y aislantes. Los petroquímicos se encuentran en productos tan diversos como aspirinas, equipaje, embarcaciones, automóviles, aeronaves, ropa de poliéster, discos y cintas de grabación (figura 11.5) (Jiang *et al.*, 2025; Jung *et al.*, 2024).

Figura 11.5. Productos petroquímicos del etileno



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el propileno, otro producto petroquímico de gran importancia, se produce mediante el craqueo térmico y catalítico de nafta y gasóleos, así como de las parafinas propano y butano. El propileno y el butileno se derivan principalmente de las unidades de craqueo catalítico y del craqueo

de una fracción de nafta o gasóleo ligero para producir una gama completa de olefinas (Phung *et al.*, 2021; Zuo y Su, 2023). Prácticamente todo el propeno o propileno se fabrica a partir de propano, que se obtiene de plantas de extracción de gas natural o de gases de refinería. Los butenos (1 y 2-buteno) tienen una importancia industrial altamente significativa para procesos como la elaboración de los neumáticos para llantas de automóviles y, en general, para la síntesis de hules y plásticos (polibutadieno). Estos se originan principalmente de los gases de refinería o del craqueo de otras fracciones del crudo. El butadieno puede ser recuperado también de los mismos gases, pero, en su mayoría, es producido a través de procesos catalíticos deshidrogenerativos de los dos butenos precursores (Speight, 2006).

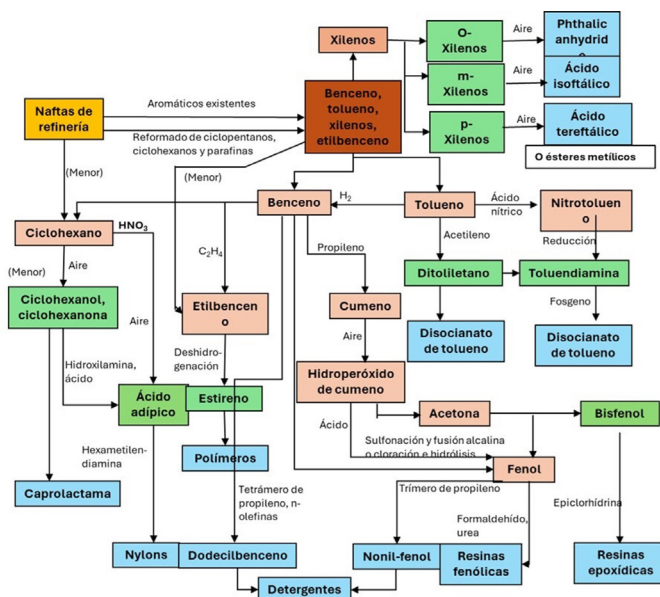
Los procesos de polimerización son esenciales en la industria petroquímica por la enorme variedad de productos de la vida cotidiana que son preparados a partir de materias provenientes de los procesos de refinación del crudo. El polietileno, por ejemplo, es derivado del etileno a moderadas temperaturas (100-120 °C) y altas presiones (10 a 20 atm) en presencia de un iniciador de radicales libres. Las bajas presiones también pueden usarse mediante el uso de catalizadores a base de sales de alquil-aluminio, por ejemplo, o catalizadores de óxidos de níquel (NiO), cromo (CrO₃), cobalto (CoO) soportados en carbón o alúmina. El polipropileno, polímero obtenido a partir del propileno, se sintetiza de un modo muy similar al etileno, y puede polimerizarse sólo o en presencia de etileno u otros monómeros para producir copolímeros de especialidad. Esto deriva en la obtención de productos con diversas propiedades mecánicas y químicas para un variado número de aplicaciones. El polibutadieno, obtenido de la polimerización del butadieno, es esencial en la industria de los neumáticos, plásticos, látex, hules sintéticos, sogas y, en general, todos los productos fabricados a base de hule. Al igual que el etileno o propileno, el butadieno es copolimerizado con estireno o acrilonitrilo para preparar polímeros con propiedades específicas (Hayes *et al.*, 2023; Koczoń *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2020; Speight, 2006).

La figura 11.6, ubicada en la siguiente página, muestra algunos de los productos que se pueden obtener a partir del propileno y los butilenos. Cabe mencionar que no se incluye la amplísima gama de polímeros que se pueden obtener de estas olefinas.

Entre las aplicaciones más importantes de los compuestos aromáticos están la preparación de polímeros como el poliestireno, producido a partir de la alquilación de benceno con etano, y su posterior deshidrogenación para obtener estireno, el cual es polimerizado por radicales libres. El poliestireno se usa en empaques, materiales de aislamiento, construcción, equipo médico, entre otros usos. Una de las aplicaciones importantes de los BTX es en la preparación de ácido tereftálico (TFA), a partir de xileno, el cual es usado en la fabricación de botellas para bebidas (Ripathy, 2017; Speight, 2006). Cabe mencionar que el PET, como se le conoce al tereftalato de polietileno, ha despertado preocupaciones por la toxicidad del BFA, lo que abre debates en torno a su uso en la industria alimenticia (Ball *et al.*, 2012).

La figura 11.7 muestra un resumen más completo de los productos obtenidos a partir de la familia de compuestos BTX.

Figura 11.7. *Productos petroquímicos producidos a partir de BTX (benceno, tolueno, xileno)*

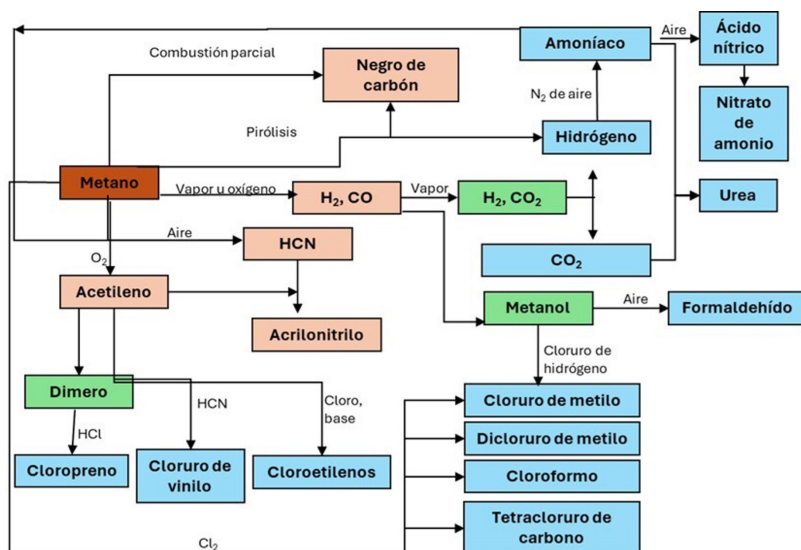


Fuente: elaboración propia.

El procesamiento de gas natural, ya sea asociado o no asociado a los procesos de producción de crudo, da como resultado metano, que es el hidrocarburo más simple que existe en la naturaleza y que contiene, debido a su alta relación H/C, el contenido calorífico más alto de todos los compuestos orgánicos; sin embargo, a pesar de su amplio uso como fuente de energía, el metano también es ampliamente utilizado en la industria petroquímica, principalmente como fuente de hidrocarburos más pesados o en la producción de hidrógeno, cuyo uso en los procesos de refinación es vital (Caballero y Pérez, 2013; Faramawy *et al.*, 2016).

Otros productos provenientes del metano incluyen el acetileno, cianuro de hidrógeno, carbono, CO, y productos clorados, todos los cuales, a su vez, son intermediarios de un número importante de productos químicos (Speight, 2006). En la figura 11.8 se muestra un resumen de los productos químicos más importantes producidos a partir de metano.

Figura 11.8. *Productos químicos producidos a partir del metano*



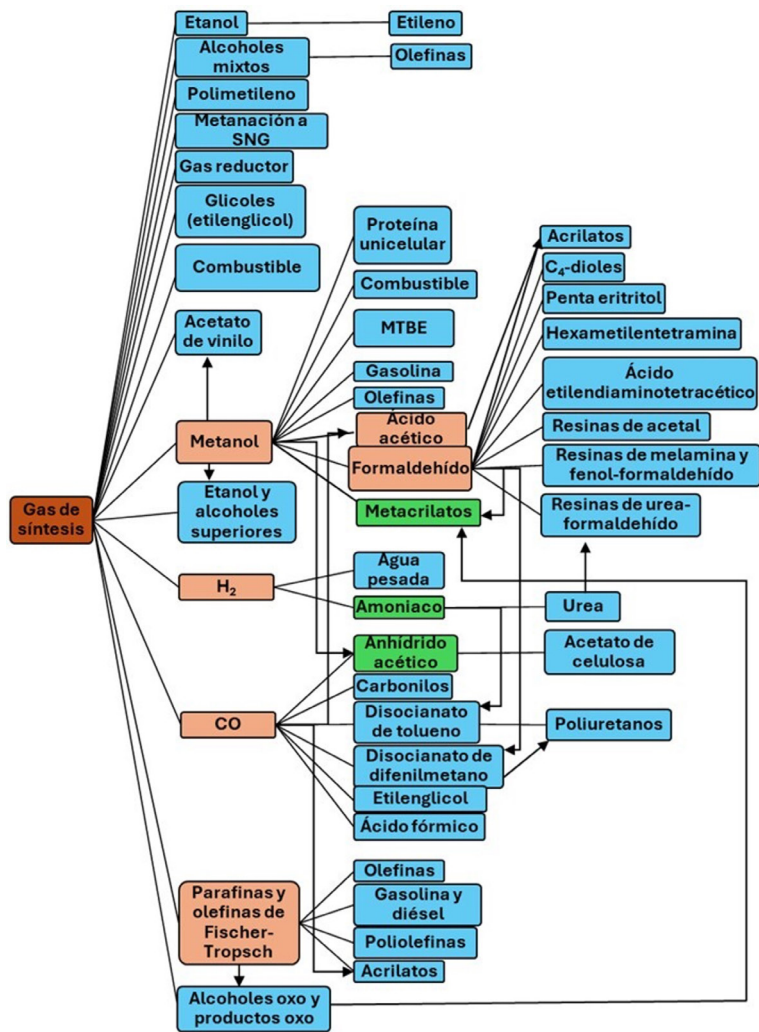
Fuente: elaboración propia.

Resulta pertinente destacar el papel del hidrógeno, el cual, si bien no es un compuesto de naturaleza orgánica, reviste gran importancia en la industria petrolera. En efecto, procesos como la reformación no serían posibles sin su participación. Por otro lado, el hidrogeno se ha vuelto esencial como fuente de energía en sí mismo o como intermediario reactivo para la síntesis de hidrocarburos superiores, como los e-combustibles antes mencionados, alcoholes, o amoniaco, producto esencial en la fabricación de fertilizantes. Hasta el momento no existe otra fuente más abundante de hidrógeno que la proveniente del proceso de reformación de metano, el cual produce grandes emisiones de CO_2 a la atmósfera. Es por ello que la investigación relacionada a la obtención de H_2 de fuentes renovables resulta fundamental para reducir las enormes cantidades de GEI relacionadas con este producto.

Gas de síntesis

Si bien el gas de síntesis (mezcla de CO y H_2) no es un producto directo de los procesos de refinación, este componente resulta de gran importancia en la industria petroquímica. El gas de síntesis se obtiene principalmente del reformado del gas natural (metano), pero también de otros hidrocarburos en procesos de térmicos (pirólisis). Uno de los productos más importantes elaborados partir del gas de síntesis es el metanol, el cual es intermediario para muchos otros compuestos químicos como el formaldehído. Sin embargo, con la invención del proceso Fischer-Tropsch, el uso de gas de síntesis ha cobrado especial interés para la producción de hidrocarburos superiores, como la gasolina sintética, diésel sintético o combustible de aviación que, cuando son producidos a partir de hidrógeno verde, se vuelven e-combustibles (Chan *et al.*, 2021, 2021; El-Nagar *et al.*, 2019; Lisbona *et al.*, 2023; Ranjekar y Yadav, 2021). Esto hace especialmente importante a esta mezcla de gases. En la figura 11.9 se detallan los productos químicos más importantes que se originan del gas de síntesis.

Figura 11.9. Productos químicos derivados del gas de síntesis (syngas)



Fuente: elaboración propia.

Expectativas de la industria petroquímica a futuro

Del mismo modo que con los combustibles fósiles, la reducción en materias primas provenientes del petróleo será una de las premisas para el futuro

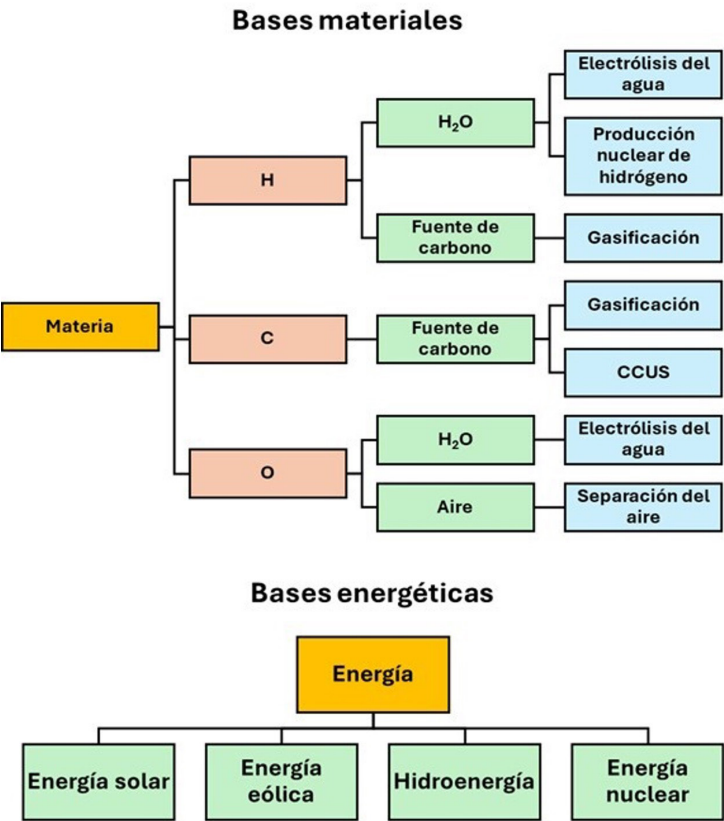
de la industria petrolera. Esto se logrará gracias a una mayor inversión en tecnologías para química C-1, es decir, la química de compuestos de un átomo de carbono. Como bien se sabe, el metano se puede obtener directamente de yacimientos de petróleo como gas asociado, pero también de fuentes biogénicas como gas natural, o como componentes de hidratos de metano en el subsuelo o los mares profundos (Faramawy *et al.*, 2016). El desarrollo de tecnologías más eficientes para producir compuestos químicos a partir del metano minimizará en un futuro la dependencia de las materias primas provenientes de los procesos de refinación, ya que prácticamente todos los precursores químicos que actualmente provienen de los derivados del petróleo (parafinas, olefinas, aromáticos, CO e hidrógeno) también pueden obtenerse a partir del metano (Caballero y Pérez, 2013).

Las iniciativas para el desarrollo de tecnologías de reformado en seco de metano, oxidación parcial, etc., las cuales dan lugar al gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$), darían lugar a procesos de transformación en los cuales se podrían simplificar los procesos petroquímicos usando la química C1 como principal materia prima. Otros de los retos importantes es la obtención de hidrógeno debido a que el proceso actual para producirlo es sumamente contaminante (hidrógeno gris). Si bien el metano es una importante fuente de hidrógeno, las inversiones en la obtención de este valioso gas por métodos electroquímicos a partir del agua representan una alternativa mucho más sustentable para el futuro (Dash *et al.*, 2023).

Como se puede ver en la figura 11.10, el metanol, producto químico de alta demanda en el mercado, se prepara en la actualidad a partir del gas de síntesis; por ello, para los próximos años, se espera que procesos como metanol a olefinas (MTO), metanol a propileno (MTP), y el proceso Fischer-Tropsch, para convertir gas de síntesis a hidrocarburos, alcancen niveles de producción que cubran la necesidad del mercado en más del 50%. Es por esta razón que se debe lograr la producción sostenible de hidrógeno en un futuro cercano, lo cual está íntimamente relacionado con un uso más eficiente de energías renovables, como la solar, eólica, o nuclear para la obtención de la energía necesaria para romper las moléculas de agua.

La figura 11.10, ubicada en la siguiente página, muestra de modo apropiado los fundamentos materiales y energéticos requeridos para un desarrollo sustentable de la industria petrolera en las próximas décadas.

Figura 11.10. Bases materiales y energéticas para un desarrollo sustentable de la industria petroquímica



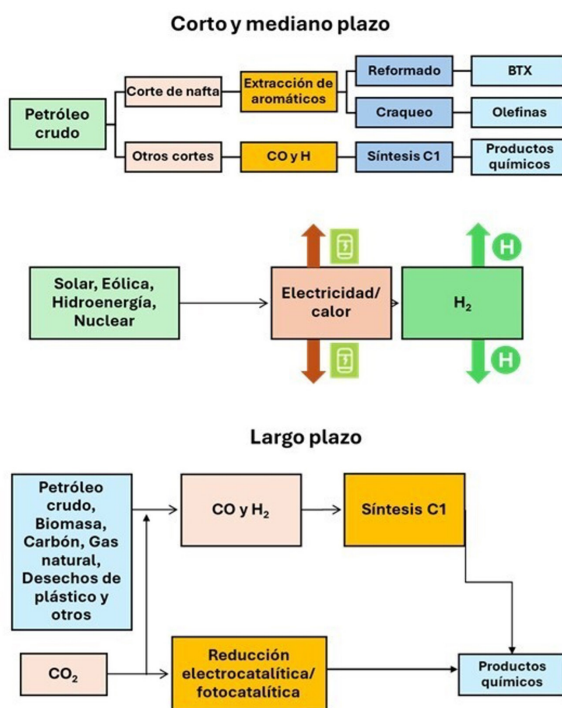
Fuente: elaboración propia.

Hacia la simplificación de procesos

La implementación del objetivo Neto Cero (net zero), que se refiere a la eliminación total de emisiones de CO₂ en cualquier sector de la economía, la obtención de materias primas y fuentes de energía renovables, será una necesidad crítica en el futuro cercano. Si bien los cambios no pueden darse de la noche a la mañana, la reconstrucción de los procesos petroquímicos tendrá que realizarse en diferentes etapas, según la evolución de la madurez

de los procesos petroquímicos actuales, el nivel de utilización de los equipos y la disponibilidad de energía renovable, la cual evolucionará a corto, mediano y largo plazo. Esto puede observarse en la figura 11.11, donde se observan las rutas de simplificación a corto, mediano y largo plazo.

Figura 11.11. Rutas de simplificación de procesos a corto, mediano y largo plazo en los procesos petroquímicos



Fuente: elaboración propia.

A corto y mediano plazo, la tecnología de hidrógeno y electricidad verdes alcanzará su madurez y escalabilidad gradualmente. Por lo tanto, las emisiones de CO_2 de la tecnología química C1 se reducirán significativamente gracias al hidrógeno y la electricidad verdes, que sustituirán al hidrógeno gris y al combustible. Las olefinas y los aromáticos producidos mediante la química C1 serán rentables. En esta etapa, basándose en los procesos petrolíferos actuales, se podrían implementar procedimientos simplificados

para fracciones pesadas (por ejemplo, aceites pesados y residuales). A largo plazo, se espera que la tecnología química C1 alcance un alto grado de desarrollo, permitiendo la integración de los procesos de transformación química basados en gas de síntesis con la producción de hidrógeno verde y el uso de energías renovables. Este enfoque conduciría a un esquema unificado para la producción de compuestos químicos a partir de diversas materias primas, incluyendo gas natural, petróleo crudo, biomasa, carbón, residuos plásticos y CO₂ como fuente adicional de carbono. Tales procesos de transformación deberán ser lo suficientemente eficientes energéticamente y altamente selectivos para comprobar una alta conveniencia económica (Zhang *et al.*, 2024).

A mediano y largo plazo, una vez que los combustibles para el transporte sean reemplazados por baterías, el consumo mundial de petróleo crudo disminuirá significativamente. En ese momento, la relación entre la oferta y la demanda de petróleo se reestructurará; el precio del carbono proveniente del petróleo crudo y del carbón se unificará, y el costo total de la gasificación será similar (Zhang *et al.*, 2024).

Conclusiones

Con los actuales avances en tecnologías energéticas sustentables, el ser humano tiene todo para alcanzar las metas actuales en la reducción de emisiones para el pacto 2050. Es pertinente entender que los avances actuales y los desarrollos futuros tienen esta premisa como principal objetivo en los procesos de investigación y desarrollo, pues se busca lograr el tan anhelado desarrollo sostenible. Cabe señalar que la industria automotriz enfrenta uno de los mayores compromisos en materia de reducción de emisiones, situándose entre los sectores con mayor impacto, junto con industrias como la de la construcción y la del acero. En este contexto, se prevé que la industria petrolera, tal como se conoce actualmente, experimente transformaciones profundas en las próximas décadas.

La adopción de tecnologías libres de hidrocarburos, como las celdas de combustible, así como el uso de combustibles alternativos —entre ellos el hidrógeno, el amoníaco y el ácido fórmico—, junto con la implementación de

biocombustibles de rápida regeneración, permitirá que el sector del transporte reduzca progresivamente su dependencia de los combustibles fósiles. Por su parte, la industria petroquímica tiende a evolucionar hacia esquemas menos dependientes del petróleo, mediante innovaciones en el ámbito de la química C1, basada en derivados del gas de síntesis. Este enfoque podría, en el largo plazo, posibilitar la producción de compuestos petroquímicos sin requerir directamente petróleo como materia prima.

En paralelo, la industria del reciclaje deberá experimentar un crecimiento acelerado para aprovechar los residuos petroquímicos, particularmente los plásticos, a partir de los cuales es posible recuperar gas de síntesis y reincorporarlo a los ciclos productivos. No obstante, persisten desafíos significativos que requerirán mayores inversiones en ciencia y tecnología para ser superados, especialmente bajo escenarios de transición energética ambiciosos.

Referencias

- A hybrid that feels more like an EV? Nissan's e-Power technology explained. (2024, agosto 28). *AutoBuzz.My*. <https://autobuzz.my/2024/08/28/a-hybrid-that-feels-more-like-an-ev-nissans-e-power-technology-explained/>
- Abdullah, B., Syed Muhammad, S. A. F., Shokravi, Z., Ismail, S., Kassim, K. A., Mahmood, A. N., y Aziz, M. M. A. (2019). Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.018>
- Ali Ijaz Malik, M., Zeeshan, S., Khubaib, M., Ikram, A., Hussain, F., Yassin, H., y Qazi, A. (2024). A review of major trends, opportunities, and technical challenges in biodiesel production from waste sources. *Energy Conversion and Management: X*, 23, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100675>
- Ball, G. L., McLellan, Clifton J., y Bhat, V. S. (2012). Toxicological review and oral risk assessment of terephthalic acid (TPA) and its esters: A category approach. *Critical Reviews in Toxicology*, 42(1), 28-67. <https://doi.org/10.3109/10408444.2011.623149>
- Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., y Guzmán-Mendoza, M. (2024). A review on low carbon fuels for road vehicles: The good, the bad and the energy potential for the transport sector. *Fuel*, 361, 130647. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130647>
- Binjie, L., y Xinyu, L. (1994). Characteristics of aromatic hydrocarbons in crude oils. *Chinese Journal of Geochemistry*, 13(2), 97-106. <https://doi.org/10.1007/BF02838510>
- Boretti, A. (2024). Advancements in E-Fuel combustion systems for a sustainable energy

- future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 79, 258-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.006>
- Busca, G. (2021). Production of Gasolines and Monocyclic Aromatic Hydrocarbons: From Fossil Raw Materials to Green Processes. *Energies*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en14134061>
- Caballero, A., y Pérez, P. J. (2013). Methane as raw material in synthetic chemistry: The final frontier. *Chemical Society Reviews*, 42(23), 8809-8820. <https://doi.org/10.1039/C3CS60120J>
- Chan, Y. H., Syed Abdul Rahman, S. N. F., Lahuri, H. M., y Khalid, A. (2021). Recent progress on CO-rich syngas production via CO₂ gasification of various wastes: A critical review on efficiency, challenges and outlook. *Environmental Pollution*, 278, 116843. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116843>
- Cherwoo, L., Gupta, I., Flora, G., Verma, R., Kapil, M., Arya, S. K., Ravindran, B., Khoo, K. S., Bhatia, S. K., Chang, S. W., Ngamcharussrivichai, C., y Ashokkumar, V. (2023). Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>
- Choi, Y. H., Jang, Y. J., Park, H., Kim, W. Y., Lee, Y. H., Choi, S. H., y Lee, J. S. (2017). Carbon dioxide Fischer-Tropsch synthesis: A new path to carbon-neutral fuels. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 605-610. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.09.072>
- Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., y Mohtasebi, B. (2019). 14 - Biofuels: Their characteristics and analysis. En D. Verma, E. Fortunati, S. Jain, y X. Zhang (Eds.), *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (pp. 277-325). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00014-X>
- DalmasNeto, C. J., Sydney, E. B., Assmann, R., Neto, D., y Soccol, C. R. (2014). Chapter 7—Production of Biofuels from Algal Biomass by Fast Pyrolysis. En A. Pandey, D.-J. Lee, Y. Chisti, y Carlos R. Soccol (Eds.), *Biofuels from Algae* (pp. 143-153). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59558-4.00007-3>
- Dash, S. K., Chakraborty, S., y Elangovan, D. (2023). A Brief Review of Hydrogen Production Methods and Their Challenges. *Energies*, 16(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/en16031141>
- Debnath, D., y Das, A. (2022). 32—Third-generation biofuels and food security. En E. Jacob-Lopes, L. Q. Zepka, I. A. Severo, y M. M. Maroneze (Eds.), *3rd Generation Biofuels* (pp. 757-768). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90971-6.00041-3>
- Dell'Aversano, S., Villante, C., Gallucci, K., Vanga, G., y Di Giuliano, A. (2024). E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, 17(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/en17163995>
- Delso-Vicente, A.-T., Camperos, M.-C., y Almonacid-Durán, M. (2025). The evolution of electric and hybrid vehicles and their influence on sustainable transport: A review and future research lines. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 4(2), 100100. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2025.100100>
- Dey, A., Ghosh, S., y Kar, D. (2023). Greening the Petrochemical Industry: Strategies for Sustainability. *Progress in Petrochemical Science*, 5(2), 488-490.
- Dybiński, O., Szablowski, Ł., Martsinchyk, A., Szczęśniak, A., Milewski, J., Grzebielec, A., y

- Shuhayeu, P. (2025). Overview of the e-Fuels Market, Projects, and the State of the Art of Production Facilities. *Energies*, 18(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/en18030552>
- Edenhofer, O., y Seyboth, K. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). En J. F. Shogren (Ed.), *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics* (pp. 48-56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375067-9.00128-5>
- El-Nagar, R. A., Ghanem, A. A., El-Nagar, R. A., y Ghanem, A. A. (2019). Syngas Production, Properties, and Its Importance. En *Sustainable Alternative Syngas Fuel*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89379>
- Faramawy, S., Zaki, T., y Sakr, A. A.-E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J., y Panichelli, L. (2009). Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*, 100(21), 4919-4930. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.067>
- Hannah, L. (2011). Chapter 2—The Climate System and Climate Change. En L. Hannah (Ed.), *Climate Change Biology* (pp. 13-52). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374182-0.00002-9>
- Hasan, N., y Ratnam, M. V. (2022). Biodiesel Production from Waste Animal Fat by Transesterification Using H₂SO₄ and KOH Catalysts: A Study of Physiochemical Properties. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022(1), 6932320. <https://doi.org/10.1155/2022/6932320>
- Hayes, G., Laurel, M., MacKinnon, D., Zhao, T., Houck, H. A., y Becer, C. R. (2023). Polymers without Petrochemicals: Sustainable Routes to Conventional Monomers. *Chemical Reviews*, 123(5), 2609-2734. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00354>
- Ishaq, H., Dincer, I., y Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy, SI: Progress in Hydrogen Production, Storage and Distribution (Ahmadi)*, 47(62), 26238-26264. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>
- Jahangiri, H., Bennett, J., Mahjoubi, P., Wilson, K., y Gu, S. (2014). A review of advanced catalyst development for Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons from biomass derived syn-gas. *Catalysis Science and Technology*, 4(8), 2210-2229. <https://doi.org/10.1039/C4CY00327F>
- Jiang, C., He, F., Zhang, L., Wang, G., y Liu, L. (2025). Trends in industrial ethylene production: Innovation in process and catalyst design. *Chem Catalysis*, 5(1), 101241. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2024.101241>
- Jin, C., Li, X., Xu, T., Dong, J., Geng, Z., Liu, J., Ding, C., Hu, J., El ALAOUI, A., Zhao, Q., y Liu, H. (2023). Zero-Carbon and Carbon-Neutral Fuels: A Review of Combustion Products and Cytotoxicity. *Energies*, 16(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/en16186507>
- Jung, W., Lee, J., y Ha, K.-S. (2024). Ethylene production processes in a carbon-neutral strategy. *Energy Conversion and Management*, 311, 118462. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118462>
- Kalak, T. (2023). Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future. *Energies*, 16(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/en16041783>

- Koczoń, P., Bartyzel, B., Iuliano, A., Klensporf-Pawlik, D., Kowalska, D., Majewska, E., Tarnowska, K., Zieniuk, B., y Gruczyńska-Sękowska, E. (2022). Chemical Structures, Properties, and Applications of Selected Crude Oil-Based and Bio-Based Polymers. *Polymers*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/polym14245551>
- Lisbona, P., Bailera, M., y Pérez, V. (2023). Chapter 4—Methane production from syngas. En M. R. Rahimpour, M. A. Makarem, & M. Meshksar (Eds.), *Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications* (Vol. 3, pp. 93-109). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91878-7.00005-8>
- Malik, K., Capareda, S. C., Kamboj, B. R., Malik, S., Singh, K., Arya, S., y Bishnoi, D. K. (2024). Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Fuels*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/fuels5020010>
- Megia, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., y Carrero, A. (2021). Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy & Fuels*, 35(20), 16403-16415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
- Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Alkhalidi, A., Salameh, T., Abo-Khalil, A. G., Hassan, M. M., y Sayed, E. T. (2022). Battery electric vehicles: Progress, power electronic converters, strength (S), weakness (W), opportunity (O), and threats (T). *International Journal of Thermofluids*, 16, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100212>
- Pan, Y., Bai, J., Yang, G., y Li, Z. (2023). Progress in the Research on Branched Polymers with Emphasis on the Chinese Petrochemical Industry. *Molecules*, 28(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/molecules28237934>
- Phung, T. K., Pham, T. L. M., Vu, K. B., y Busca, G. (2021). (Bio)Propylene production processes: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105673. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105673>
- Pramanik, A., Sinha, A., Chaubey, K. K., Hariharan, S., Dayal, D., Bachheti, R. K., Bachheti, A., y Chandel, A. K. (2023). Second-Generation Bio-Fuels: Strategies for Employing Degraded Land for Climate Change Mitigation Meeting United Nation-Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 15(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su15097578>
- Ramadhass, A. S. (Ed.). (2016). *Alternative Fuels for Transportation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16260>
- Ranjekar, A. M., y Yadav, G. D. (2021). Dry reforming of methane for syngas production: A review and assessment of catalyst development and efficacy. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.jjics.2021.100002>
- Ripathy, D. B. (2017). Applications of Petrochemicals: A Mini Review. *Recent Advances in Petrochemical Science*, 2(4). <https://doi.org/10.19080/RAPSCI.2017.02.555594>
- Romm, J. (2006). The car and fuel of the future. *Energy Policy*, 34(17), 2609-2614. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.025>
- Sadaqat, B., Dar, M. A., Xie, R., y Sun, J. (2025). Chapter 3 - Drawbacks of first-generation biofuels: Challenges and paradigm shifts in technology for second- and third-generation biofuels. En D. Zhu, M. A. Dar, y Mohd. Shahnawaz (Eds.), *Biofuels and Sustainability* (pp. 33-47). Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21433-2.00003-7>
- Sadeghbeigi, R. (2012). Chapter 3—FCC Feed Characterization. En R. Sadeghbeigi (Ed.),

- Fluid Catalytic Cracking Handbook (Third Edition)* (pp. 51-86). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386965-4.00003-3>
- Sandaka, B. P., y Kumar, J. (2023). Alternative vehicular fuels for environmental decarbonization: A critical review of challenges in using electricity, hydrogen, and biofuels as a sustainable vehicular fuel. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100442>
- Shen, J., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., y Yang, Z. (2020). Recent Progress in Polymer-Based Building Materials. *International Journal of Polymer Science*, 2020(1), 8838160. <https://doi.org/10.1155/2020/8838160>
- Singh, H., Li, C., Cheng, P., Wang, X., y Liu, Q. (2022). A critical review of technologies, costs, and projects for production of carbon-neutral liquid e-fuels from hydrogen and captured CO₂. *Energy Advances*, 1(9), 580-605. <https://doi.org/10.1039/D2YA00173J>
- Speight, J. G. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (4.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420008388>
- Suganuma, S., y Katada, N. (2020). Innovation of catalytic technology for upgrading of crude oil in petroleum refinery. *Fuel Processing Technology*, 208, 106518. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106518>
- Ullah, F., Dong, L., Bano, A., Peng, Q., y Huang, J. (2016). Current advances in catalysis toward sustainable biodiesel production. *Journal of the Energy Institute*, 89(2), 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.01.018>
- Vasileiadou, A. (2024). From Organic Wastes to Bioenergy, Biofuels, and Value-Added Products for Urban Sustainability and Circular Economy: A Review. *Urban Science*, 8(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030121>
- Wishart, R. S. (1978). Industrial Energy in Transition: A Petrochemical Perspective. *Science*, 199(4329), 614-618. <https://doi.org/10.1126/science.199.4329.614>
- Zentani, A., Almaktoof, A., y Kahn, M. T. (2024). A Comprehensive Review of Developments in Electric Vehicles Fast Charging Technology. *Applied Sciences*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/app14114728>
- Zhang, Y., Xing, E., Han, W., Yang, P., Zhang, S., Liu, S., Cao, D., y Li, M. (2024). Petrochemical Industry for the Future. *Engineering*, 43, 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.06.017>
- Zuo, C., y Su, Q. (2023). Research Progress on Propylene Preparation by Propane Dehydrogenation. *Molecules*, 28(8), 3594. <https://doi.org/10.3390/molecules28083594>