

3. Los catalizadores en la industria petrolera



DOI: [cc.443.03](https://doi.org/10.4437/03)

JOSÉ GONZALO HERNÁNDEZ CORTEZ*

Resumen

Los catalizadores desempeñan un papel fundamental en la industria petrolera, ya que permiten que numerosas reacciones químicas necesarias para la conversión y mejora de hidrocarburos ocurran de forma eficiente, económica y sostenible. Estos productos químicos facilitan y aceleran reacciones sin consumirse en el proceso, haciendo posibles transformaciones que serían lentas, costosas o incluso inviables bajo condiciones normales.

En los procesos de refinación del petróleo, como el craqueo catalítico, la hidrogenación, la alquilación y la desulfuración, los catalizadores son esenciales para convertir el crudo en productos finales de alto valor como la gasolina, el diésel, combustibles para aviones (turbosina) y materias primas petroquímicas.

En este capítulo descubriremos la gran importancia de los catalizadores en la industria petrolera, y como su uso en la mayor parte de los procesos que permiten la transformación del crudo en productos de alto valor, tanto energéticos como petroquímicos.

Palabras clave: *catalizadores, procesos catalíticos, sistemas homogéneos, sistemas heterogéneos.*

* Doctor en Ciencias. Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo, México. ORCID: 0000-0003-2231-2825; Scopus: 6508277057; correo electrónico: jhcortez@imp.mx

Introducción

En la industria petrolera, los catalizadores juegan un papel fundamental al facilitar la transformación de los hidrocarburos en productos de mayor valor comercial, como combustibles, lubricantes y petroquímicos esenciales.

El término catalizador lo introdujo el químico sueco Jöns Jakob Berzelius en 1935 para describir una fuerza que dirigía reacciones químicas en presencia de ciertas sustancias sin ser parte de los productos (Corson, 1947; Wisniak, 2010). Las grandes aplicaciones industriales coinciden con el desarrollo de nuevos catalizadores y de los fenómenos que involucran en las reacciones. Estos fenómenos son la parte medular de los procesos químicos aplicados a gran escala.

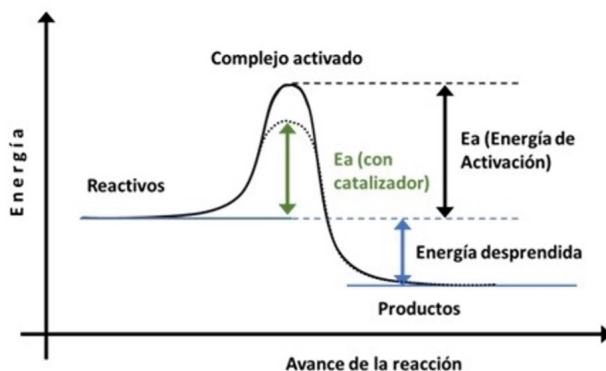
Se tienen referencias documentadas de procesos catalíticos en las culturas antiguas, como los basados en la conversión enzimática de azúcares para la producción de bebidas alcohólicas y los correspondientes a la elaboración del pan y el queso. Sin embargo, el primer reporte formal de un trabajo sobre catálisis data de 1817 (Wisniak, 2010).

Definición y función de los catalizadores

La mayoría de las reacciones químicas no se llevan a cabo con solo poner en contacto los reactivos involucrados. Es necesario, para provocar la reacción, suministrar energía inicial en forma de calor, agitación, luz o electricidad. Para motivar el proceso reactivo se requiere de una cantidad de energía (energía de activación) de tal magnitud que, antes de que esto ocurra, podrían ocurrir otro tipo de reacciones laterales de menor energía de activación, lo cual lleva a productos indeseables (Primak, 1955).

El papel de los catalizadores es precisamente el de reducir la necesidad de la energía de activación o inicial para que se lleven a cabo las reacciones deseadas (figura 3.1, ubicada en la siguiente página).

El término catalizador lo introdujo el químico sueco Jöns Jakob Berzelius en 1836 para identificar aquellos compuestos que promueven reacciones químicas sin ser parte de los productos (Wisniak, 2000).

Figura 3.1. Efecto del catalizador en la energía de activación

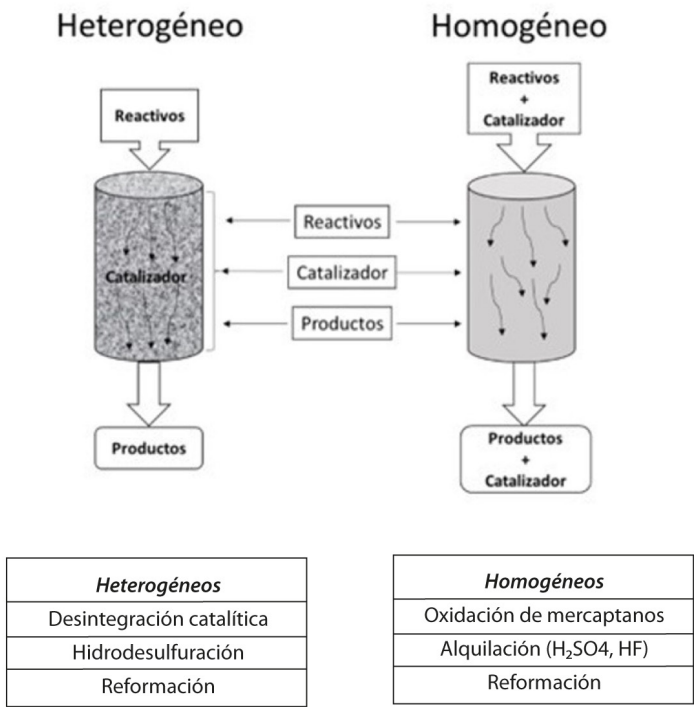
Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, los catalizadores son sustancias que aceleran las reacciones químicas sin consumirse en el proceso, modifican la velocidad de las reacciones termodinámicamente factibles, lo que permite mejorar su productividad y aplicarlas industrialmente en condiciones económicamente favorables.

En términos generales, los factores que determinan la selección de un catalizador adecuado para su aplicación son (Wang y Xiao, 2014): i) *actividad y selectividad*, la actividad se define como la capacidad para lograr la conversión de reactivos a productos y la selectividad es el rendimiento del producto o de los productos de interés a una conversión dada, un buen catalizador debe facilitar la reacción deseada sin generar subproductos no deseados; ii) *estabilidad térmica y química*, la estabilidad es la capacidad de mantener la actividad y la selectividad a lo largo del tiempo de uso y debe soportar las condiciones extremas de temperatura y presión; y finalmente iii) *costo y disponibilidad*, algunos metales preciosos, como el platino, pueden ser costosos, por lo que se buscan alternativas más económicas y eficientes. En la industria petrolera, los catalizadores juegan un papel fundamental al facilitar la transformación de los hidrocarburos en productos de mayor valor comercial, como combustibles, lubricantes y petroquímicos esenciales. Los catalizadores pueden ser empleados en sistemas homogéneos y heterogéneos (Carberry, 2001).

Los *catalizadores homogéneos* son moléculas de cierto nivel de complejidad que operan en la misma fase que los reactivos, generalmente en solución, o se incorporan directamente a los mismos sin separación de fases. Aunque son menos comunes en la refinación, se emplean en algunas reacciones específicas donde se requiere alta selectividad. Los *catalizadores heterogéneos* se emplean en estado sólido y los reactivos se encuentran en fase líquida o gaseosa. La refinación del petróleo depende de la catálisis para mejorar la eficiencia de los procesos, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. Sin el uso de catalizadores, la producción de combustibles limpios y de alto rendimiento sería significativamente más costosa y menos viable (figura 3.2).

Figura 3.2. Sistemas catalíticos homogéneos y heterogéneos



Fuente: elaboración propia.

También, dependiendo de su composición química, los catalizadores pueden clasificarse en:

- *Metálicos*: incluyen elementos como platino, paladio, níquel, molibdeno y cobalto, estos elementos son depositados o dispersados sobre soportes. Se utilizan en procesos como el hidrotratamiento y el reformado catalítico.
- *No metálicos*: principalmente zeolitas, óxidos metálicos y otros materiales cerámicos, empleados en el craqueo catalítico para mejorar la conversión de hidrocarburos.

Los catalizadores en la industria petrolera

El petróleo está constituido por miles de especies químicas que, entre otras propiedades, se diferencian por su volatilidad. De esta manera, la destilación se convierte en la operación lógica para lograr la separación de los hidrocarburos y, precisamente la temperatura inicial y final de destilación, establece la distinción entre los productos del procesamiento del petróleo, principalmente la gasolina y el diésel.

La industria de la refinación del petróleo ha tenido una notable evolución, pasando de ser procesos basados en la separación física de los hidrocarburos a procesos de transformación química que permiten reconstituir las moléculas de los hidrocarburos. Durante la Primera Guerra Mundial, la demanda de gasolina de alto octano para la fuerza aérea propició el perfeccionamiento del proceso de desintegración térmica de los hidrocarburos pesados, que se habían incorporado en 1912, y aparece el primer catalizador en la industria de refinación, el cloruro de aluminio (AlCl_3), un ácido de Lewis, el cual favorece las reacciones de desintegración. Con esto, se inicia la era de la catálisis que habría de dominar la evolución de la industria (Wisniak, 2010).

Los combustibles actuales están constituidos, en más del 80%, por los productos resultantes de transformaciones químicas en procesos catalíticos. Las reacciones químicas concurrentes en la industria petrolera pueden clasificarse en tres tipos principales: de desintegración, de síntesis y de arreglo molecular (tabla 3.1) (Akhtar *et al.*, 2024). En los siguientes apartados se presenta una descripción de los desarrollos de catalizadores que se han dado en los principales procesos que integran una refinería petrolera.

Tabla 3.1. Principales reacciones químicas en la industria petrolera

PROCESOS QUÍMICOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA		
De desintegración	De arreglo molecular	De síntesis
Craqueo térmico	Reformación	Alquilación
Hidro craqueo	Isomerización	Eterificación
Coquización	Hidrosulfuración	Dimerización
FCC	Hidrogenación de olefinas y de diolefinas	Polimerización
Reducción de viscosidad	Saturación de aromáticos	
Gasificación	Deshidrogenación	

Fuente: elaboración propia.

Principales procesos catalíticos en la industria petrolera

La refinación del petróleo depende, en gran medida, de la catálisis para optimizar la conversión de crudos en productos más valiosos. Los procesos catalíticos permiten obtener combustibles más limpios, un mejor rendimiento energético y la reducción de emisiones contaminantes. Los principales procesos catalíticos en la industria petrolera son (Akhtar *et al.*, 2024):

- 1) *Hidrotratamiento*: eliminación de contaminantes como azufre, nitrógeno y metales pesados para obtener productos más limpios.
- 2) *Craqueo catalítico*: ruptura de moléculas grandes para generar combustibles más livianos, como gasolina y diésel.
- 3) *Reformado catalítico*: conversión de hidrocarburos en compuestos aromáticos para mejorar el octanaje de las gasolinas.
- 4) *Isomerización y alquilación*: modificación de estructuras moleculares para obtener combustibles más eficientes y con mejor desempeño.

Hidrotratamiento: eliminación de contaminantes

Los procesos de hidrotratamiento juegan un papel muy importante en la industria petrolera, no sólo en el procesamiento de fondo de barril, en su versión de hidrosintegración, sino para la eliminación o reducción de

contaminantes, lo que mejora la calidad de los combustibles (tabla 3.2, ubicada en la siguiente página) (Speight, 2014c). Estos procesos se llevan a cabo en presencia de catalizadores como níquel, molibdeno y cobalto, los cuales facilitan la eliminación de (Anilkumar *et al.*, 2020; Oh *et al.*, 2019; Speight, 2014c):

- *Azufre*: reduce las emisiones de óxidos de azufre (SOx) en la combustión.
- *Nitrógeno*: evita la formación de contaminantes atmosféricos nocivos.
- *Metales pesados*: protege los equipos de refinación y mejora la eficiencia del proceso.

Estos procesos cumplen funciones muy importantes en el esquema de refinación, que es: preparar la carga para las unidades de reformación de naftas e isomerización, cumplir con el propósito de reducción de azufre en los combustibles, y permitir el acondicionamiento de cargas para los procesos de FCC y de alquilación.

Tabla 3.2. Procesos de hidrotratamiento empleando catalizadores de CoMo y NiMo en soportes de Al_2O_3 (Anilkumar *et al.*, 2020; Characteristics of zeolite-modified NiMo/ Al_2O_3 catalysts and their hydrotreating performance for light cycled oil - Hu - 2019 - The Canadian Journal of Chemical Engineering - Wiley Online Library, s. f.; Speight, 2014c)s.

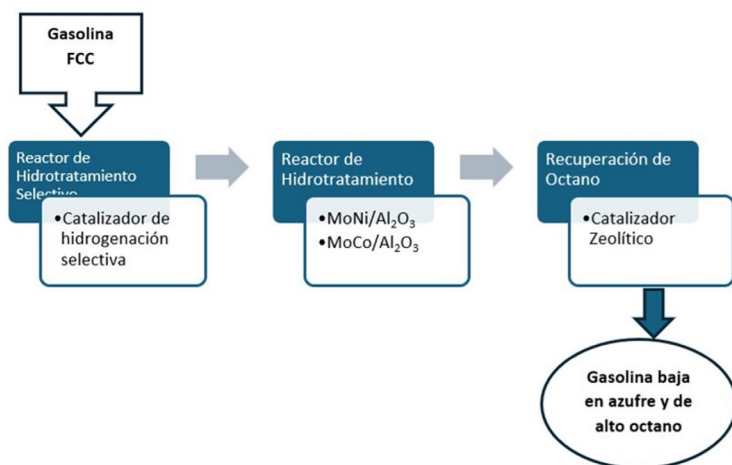
Fracción	Objetivo
Gasolina	• Eliminación de azufre • Saturación de olefinas de corrientes provenientes de procesos térmicos • Inhibición de las reacciones de hidrodeseintegración
Diésel	• Eliminación de azufre • Saturación de olefinas de ACL de corrientes provenientes de procesos térmicos • Saturación de aromáticos

Fuente: elaboración propia.

La reducción de azufre en la gasolina, que se hace muy convenientemente para el buen funcionamiento de los convertidores catalíticos, representa uno de los principales retos en el desarrollo de los catalizadores (Speight, 2014c). La gasolina catalítica proveniente del proceso FCC, principal componente del “pool” de gasolina en una refinería moderna, tiene un alto contenido de azufre. Su tratamiento requiere de un catalizador selectivo de

hidrodesulfuración que no promueva las reacciones de saturación de las olefinas, o bien, de la incorporación de un proceso catalítico complementario con el que se recupere el octano perdido por la saturación olefínica. Para la primera opción, se enfoca en el envenenamiento selectivo de un catalizador convencional que inhiba su acción hidrogenante. Para la segunda opción, se tiene disponible un catalizador a base de zeolita ZSM-5 que permite reacciones de isomerización, alquilación de anillos bencénicos y transalquilación, pero tiene el inconveniente de una hidrodesintegración simultánea que reduce el rendimiento de la gasolina (figura 3.3) (Primo y García, 2014).

Figura 3.3. Alternativas para la reducción de azufre en gasolina FCC



Fuente: elaboración propia.

Craqueo catalítico

El proceso central de una refinería moderna es el de desintegración catalítica de gasóleo. Este proceso tiene como propósito transformar cortes pesados, típicamente gasóleo de la destilación al vacío, en productos más valiosos como gasolina, olefinas ligeras y aceite cíclico ligero, el cual es puede ser sometido a un posprocesamiento para la producción de diésel (Sadeghbeigi, 2012). El craqueo de hidrocarburos, además de haber sido el primer proceso catalítico de la industria petrolera, puede calificarse como el más

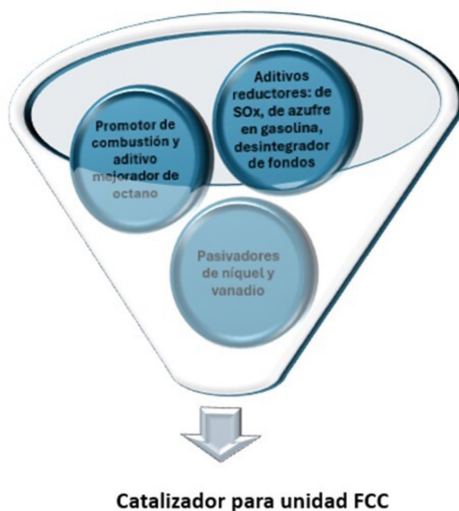
trascendente en términos de su rentabilidad al permitir la transformación de fracciones pesadas a productos ligeros de mucho mayor valor económico (Speight, 2014a).

La primera versión del proceso con cloruro de aluminio (Free, 1942), que se mencionó anteriormente, fue desplazada por el proceso Houdry con una primera unidad comercial en 1936, que utilizaba arcillas naturales constituidas por montmorilonita tratada con soluciones ácidas (Emam, 2013). A lo largo del tiempo, el proceso evolucionó desde sistemas de lecho fijo, pasando por lechos móviles (TCC), hasta llegar a la desintegración catalítica fluida (FCC), que comenzó a utilizarse comercialmente en 1942 (Magee y Mitchell, 1993). La demanda de catalizadores de mayor resistencia mecánica, una mayor estabilidad y ligeramente mayor actividad llevó a una serie de avances en el desarrollo de catalizadores.

Las características requeridas del catalizador condujeron al estudio de materiales naturales, denominados zeolitas (Magee y Mitchell, 1993), que son silicoaluminatos microporosos formados por redes cristalinas que limitan el acceso al interior de su estructura a moléculas de tamaños no superiores al diámetro de poro característico de las mismas. Estos catalizadores zeolíticos permiten la fragmentación de las moléculas grandes de crudo mediante reacciones de ruptura controladas. La aplicación industrial de este catalizador zeolítico inició en 1962 (Vogt y Weckhuysen, 2015) y fue un éxito rotundo al alcanzar un rendimiento de gasolina de 52%. Los nuevos materiales zeolíticos han permitido, además, reducir el contenido olefinico de las gasolinas catalíticas al favorecer la formación de isoparafinas y compuestos aromáticos por la mayor actividad en las reacciones con transferencia de hidrógeno. Esto maximiza el rendimiento de los combustibles de mejor calidad, alcanzando valores superiores a 92 octanos (Choudary y Newalkar, 2011; Degnan, 2000).

Los catalizadores han mejorado en su selectividad alcanzando rendimientos del 60% en gasolina, y se han complementado con el desarrollo de aditivos catalíticos pasivadores de metales, promotores de la combustión del monóxido de carbono para la remoción del óxido de azufre en las gasolinas y promotores de la desintegración de fondos. El diseño de estos catalizadores depende de las demandas y condiciones de operación de cada unidad de procesos (figura 3.4, ubicada en la siguiente página).

Figura 3.4. Aditivos que forman parte del catalizador para unidades FCC



Fuente: elaboración propia.

Hidrodesintegración

En la misma línea de procesamiento de fondo de barril para transformar cargas pesadas en fracciones ligeras, los procesos de hidrodesintegración representan una opción complementaria en las operaciones de refinación (Speight, 2014b). La característica fundamental de los catalizadores usados en estos procesos es su naturaleza bifuncional al incorporar un componente de carácter ácido y otro de acción hidrogenante y/o de hidrogenólisis. La función hidrogenante se obtiene mediante la presencia de níquel. Por su parte, la combinación de los metales cobalto-molibdeno promueve la hidrogenólisis (Sartipi *et al.*, 2013) y la función ácida la proporciona el soporte, por lo que se pueden utilizar alúminas activas de alta acidez o alúminas modificadas con zeolitas de poro grande (Degnan, 2000; Primo y García, 2014).

La función ácida promueve las reacciones de desintegración e isomerización, mientras que la función hidrogenante es la responsable de la saturación con una mínima participación en la hidrogenólisis. La tendencia en el desarrollo de catalizadores y procesos de hidrodesintegración están relacionados con su potencial para el tratamiento de crudos pesados o sus residuales. La identificación de nuevos elementos activos y soportes, así como el desarrollo de nuevas combinaciones catalíticas, representan las acciones de investigación más relevantes en estos materiales catalíticos.

Reformado catalítico: mejora del octanaje de las gasolinas

Para obtener gasolinas de mayor calidad, el reformado catalítico transforma hidrocarburos alifáticos en aromáticos mediante el uso de catalizadores de platino y renio (Carvalho *et al.*, 2012; Tregubenko, Vinichenko, *et al.*, 2019). Este proceso incrementa el octanaje, mejorando la eficiencia del combustible en los motores y reduciendo la emisión de gases contaminantes (Speight, 2014e).

La proporción de parafinas lineales y ramificadas, nafténicos y compuestos aromáticos determina este comportamiento. Por ello, los procesos orientados a modificar la estructura molecular de las especies presentes, con el fin de favorecer aquellas de mayor octanaje, resultan indispensables para cumplir con los requerimientos de la industria automotriz, que actualmente demanda combustibles con números de octano en el rango de 80 a 100 (Ahmedzeki y Al-Tabbakh, 2016; Tregubenko, Veretelnikov, *et al.*, 2019).

El desarrollo en los avances del catalizador se enfocó a lograr una resistencia mecánica y una estabilidad acordes a las operaciones a las que tiene que ser sometido. Los catalizadores actuales, basados en la combinación de platino-estaño en un soporte de alúmina esférico, han permitido la elaboración de gasolina reformada de más de 100 octanos (Carvalho *et al.*, 2012; Jumas *et al.*, 2013; Tregubenko, Veretelnikov, *et al.*, 2019). Todos estos avances en el diseño de los catalizadores han permitido disminuir la concentración de los metales y abaratar el producto.

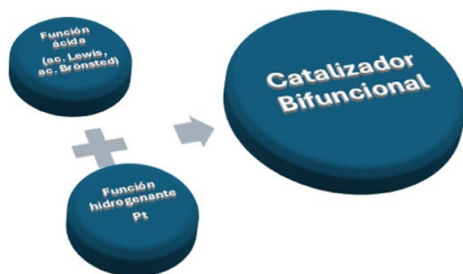
Isomerización y alquilación

De la fracción ligera de las naftas, los hidrocarburos con cinco átomos de carbono no son reformables en el sentido antes descrito, y los de seis átomos son promotores de la formación de benceno en el proceso de reformación, componente actualmente restringido en la gasolina reformulada por sus características cancerígenas. Esto ha conducido a la incorporación del proceso de isomerización de la nafta ligera en las refinerías para aumentar la proporción de los hidrocarburos ramificados de alto octano (Speight, 2014f).

La isomerización convierte moléculas de hidrocarburos lineales en estructuras ramificadas, mejorando la estabilidad y rendimiento de los combustibles. Utiliza catalizadores como cloruro de aluminio y ácidos sólidos (Hidalgo *et al.*, 2014).

La reacción de isomerización de las parafinas está limitada por las condiciones de equilibrio químico, que se favorece a bajas temperaturas, con lo que el desarrollo de los catalizadores se ha enfocado en lograr una alta actividad para conseguir que las reacciones ocurran a temperaturas reducidas. Los procesos también suelen contemplar la separación y recirculación de las parafinas lineales no convertidas. Los catalizadores que se pueden utilizar para este propósito tienen propiedades bifuncionales (figura 3.5), un componente de función ácida, incluyendo ácidos de Lewis y ácidos de Brönsted, que actúan promoviendo un mecanismo a través de carbocationes, y un componente metálico, fundamentalmente platino, que promueve las reacciones de hidrogenación (Gault, 1981; Höchtl *et al.*, 2001).

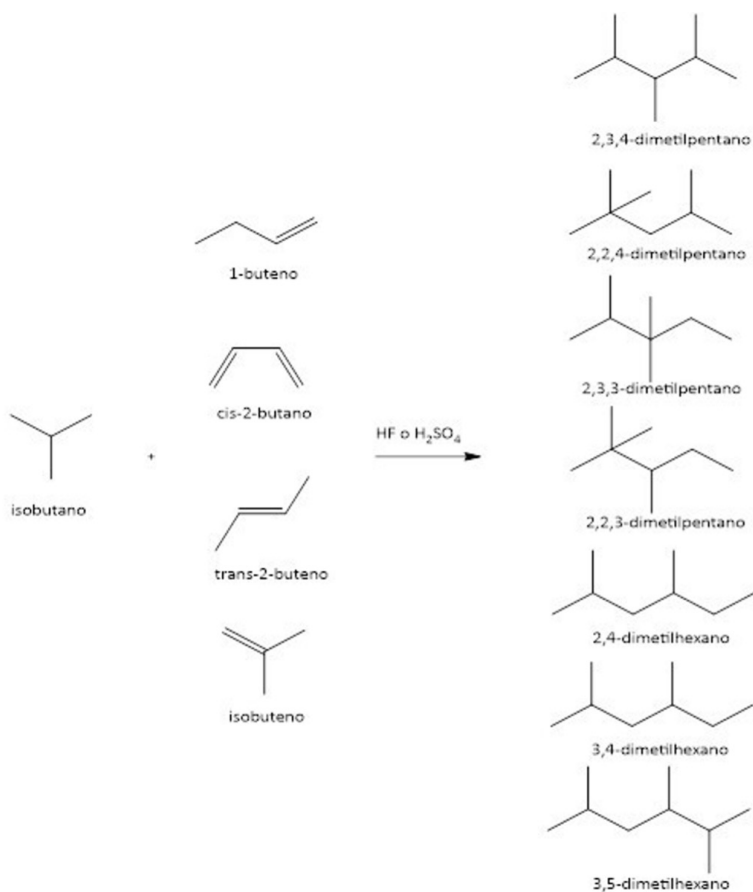
Figura 3.5. Composición del catalizador de isomerización



Fuente: elaboración propia.

En la alquilación, las parafinas reaccionan con las olefinas en presencia de cloruro de aluminio y de otros catalizadores ácidos, generando isooc-
tanos. En particular la reacción del isobutano con el propileno, butilenos
y amilenos da como resultado un producto alquilado con temperaturas de
ebullición en el rango de las gasolinas, además de contar con un elevado
número de octano (Albright, 2009; Hidalgo *et al.*, 2014; Speight, 2014f)
(figura 3.6).

Figura 3.6. Reacciones básicas de alquilación de isobutano con butenos



Fuente: elaboración propia.

Durante la Segunda Guerra Mundial el proceso de alquilación se convirtió en una importante fuente de suministro de gasolina, y desde entonces participa en los esquemas de refinación para la producción de gasolina de alto octano. Esto ha incrementado su presencia a raíz de las nuevas especificaciones de la gasolina reformulada en la que se limitan los aromáticos y las olefinas (Albright, 2009; Feller y Lercher, 2004).

Los catalizadores que se han utilizado en la alquilación incluyen ácidos de Lewis, como el cloruro de aluminio, particularmente para la reacción del isobutano con el etileno, y los ácidos protónicos como el sulfúrico y el fluorhídrico, que dominan los procesos comerciales con olefinas en el rango C3 a C5 (Harris *et al.*, 2008; Hommeltoft, 2001). En ambos casos, el catalizador se desactiva por su conversión irreversible. El cloruro de aluminio forma un líquido inmiscible de color café rojizo que tiene una mayor densidad que el producto de la reacción y no es reciclable, mientras que los ácidos sulfúrico y fluorhídrico sólo se reponen parcialmente para compensar su reacción con los hidrocarburos con los que forman los denominados aceites solubles en ácido (Albright, 2009).

La tendencia actual en el desarrollo se orienta hacia la concepción de catalizadores sólidos ácidos (Blasco *et al.*, 1998; Feller *et al.*, 2004; Gerzeliev *et al.*, 2018; Primo y García, 2014), con el objetivo de mitigar los riesgos asociados al manejo de ácidos protónicos, mejorar la viabilidad económica —dada la alta relación requerida de isobutano a olefinas— y reducir el consumo energético, particularmente en el caso del ácido sulfúrico, debido a la necesidad de refrigeración para operar a bajas temperaturas, así como su impacto ambiental.

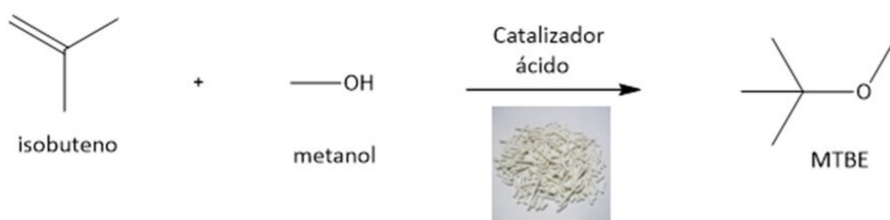
Otros procesos con catalizadores

Síntesis de éteres

La disponibilidad de olefinas ligeras del proceso FCC y la necesidad de corrientes de alto octano complementarias propició la incorporación de la síntesis de éteres por adición de metanol al isobutano e isoamileno, utilizando un catalizador ácido de intercambio iónico o zeolitas como ZSM-5 y ZSM-11 (Chu y Kuhl, 2002; Goodwin Jr. *et al.*, 2002).

El catalizador se emplea en reactores de lecho fijo o lecho expandido, dispuestos en varias etapas con sistemas de remoción de calor para compensar el carácter exotérmico de la reacción. Más recientemente, se ha incorporado su uso en columnas de destilación empacadas con catalizador, donde cumple una doble función: actuar como reactor y como medio de contacto líquido-vapor para la separación de reactivos y productos. Este enfoque, conocido como destilación catalítica, permite alcanzar mayores conversiones al posibilitar que la reacción avance más allá de las limitaciones impuestas por el equilibrio químico (figura 3.7) (Volocho *et al.*, 1986).

Figura 3.7. Proceso de producción de MTBE



Fuente: elaboración propia.

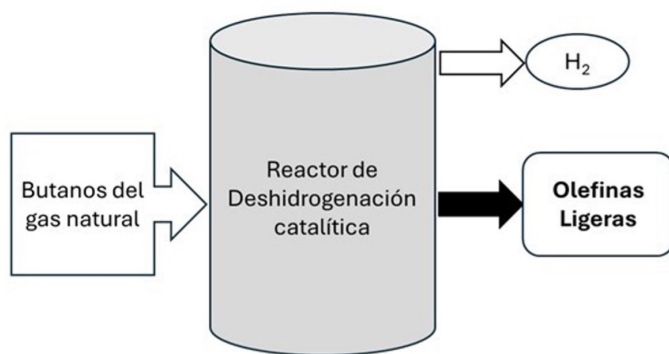
Producción de olefinas

La creciente demanda de alquilado y de éteres para satisfacer las especificaciones de la gasolina reformulada, y la limitada disponibilidad de materia prima para su elaboración, ha promovido el desarrollo de procesos y catalizadores para la obtención de olefinas, particularmente butilenos, mediante la deshidrogenación de los butanos recuperados del gas natural (figura 3.8) (Corma *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2023; Jiao *et al.*, 2016).

Los catalizadores desarrollados se basan en metales nobles o cromo, soportados en alúmina, lo que ha permitido reducir considerablemente las temperaturas en comparación con los primeros procesos térmicos utilizados en la producción de olefinas (Speight, 2014d). Aunque las

reacciones de desintegración compiten con las de deshidrogenación, estos catalizadores han permitido una selectividad aceptable para procesos comerciales.

Figura 3.8. Producción de olefinas



Catalizadores de Pd, CoMo y NiMo en soporte de alúmina

Fuente: elaboración propia.

Métodos de regeneración de catalizadores

Los catalizadores pierden actividad con el tiempo debido a diversos factores, lo que impacta la eficiencia de los procesos de refinación. Algunas causas comunes de desactivación incluyen (Oloruntoba *et al.*, 2022):

- Envenenamiento del catalizador debido a la acumulación de impurezas como azufre, nitrógeno y metales pesados.
- Coquización debido a la formación de depósitos de carbono que bloquean los sitios activos del catalizador.
- Sinterización que se debe a la alteración estructural por exposición prolongada a altas temperaturas, reduciendo la superficie activa.

La regeneración de catalizadores busca restaurar su actividad y prolongar su vida útil. Los principales métodos incluyen (Bartholomew y Argyle, 2015; Satyanarayana *et al.*, 2016):

- *Regeneración térmica*: es la aplicación de temperaturas controladas para quemar los depósitos de carbono sin dañar la estructura del catalizador.
- *Lavado químico*: es el uso de soluciones químicas para eliminar contaminantes específicos, como azufre o metales pesados.
- *Regeneración por reactivación química*: se trata de la incorporación de nuevos agentes catalíticos o tratamiento químico para restaurar la actividad del material.
- *Regeneración in situ vs. ex situ*: en algunos procesos se permite regenerar los catalizadores sin retirarlos de las unidades de refinación, mientras que, en otros, requieren el traslado a instalaciones especializadas.

Innovaciones y tendencias en catalizadores

La industria petrolera enfrenta el reto de mejorar la eficiencia de los procesos catalíticos, reducir el impacto ambiental y optimizar la producción de combustibles más limpios. En este contexto, la innovación en catalizadores ha sido clave para cumplir con las nuevas regulaciones y demandas del mercado.

Algunas tendencias en el diseño de catalizadores, para mejorar la durabilidad, la eficiencia, la selectividad, el rendimiento y la reducción de emisiones contaminantes, incluyen:

- Resistencia a la desactivación por la acumulación de impurezas.
- Optimización de procesos de regeneración para prolongar la vida útil de los catalizadores.
- Explorar catalizadores basados en compuestos no convencionales para reducir costos y mejorar la sostenibilidad.
- Diseño de catalizadores con nanopartículas metálicas para mejorar la actividad catalítica y reducir el desperdicio de metales preciosos.
- Diseño de catalizadores libre de metales pesados y biodegradables minimizando el impacto ambiental y la seguridad en su manejo.

La innovación en catalizadores ha transformado la refinación del petróleo y seguirá desempeñando un papel crucial en la transición hacia procesos más sostenibles. Con el avance de tecnologías emergentes, la industria se encamina hacia una producción más eficiente y ambientalmente responsable.

Referencias

- Ahmedzeki, N. S., y Al-Tabbakh, B. A. (2016). Catalytic Reforming of Iraqi Naphtha over Pt-Ti/HY Zeolite Catalyst. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 17(3), 45-56. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2016.3.4>
- Akhtar, M. S., Ali, S., y Zaman, W. (2024). Recent Advancements in Catalysts for Petroleum Refining. *Catalysts*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/catal14120841>
- Albright, L. F. (2009). Present and Future Alkylation Processes in Refineries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(3), 1409-1413. <https://doi.org/10.1021/ie801495p>
- Anilkumar, M., Loke, N., Patil, V., Panday, R., y G, Sreenivasarao. (2020). Hydrocracking of hydrotreated light cycle oil to mono aromatics over non-noble bi-functional (Ni-W supported) zeolite catalysts. *Catalysis Today, Proceedings of 3rd International Conference on Catalysis and Chemical Engineering*, 358, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.12.027>
- Bartholomew, C. H., y Argyle, M. D. (2015). Advances in Catalyst Deactivation and Regeneration. *Catalysts*, 5(2), 5(2), 949-954. <https://doi.org/10.3390/catal5020949>
- Blasco, T., Corma, A., Martinez, A., y Martinezescolano, P. (1998). Supported heteropolyacid (HPW) catalysts for the continuous alkylation of isobutane with 2-butene: The benefit of using MCM-41 with larger pore diameters. *Journal of Catalysis*, 177(2), 306-313. <https://doi.org/10.1006/jcat.1998.2105>
- Carberry, J. J. (2001). *Chemical and Catalytic Reaction Engineering*. Courier Corporation.
- Carvalho, L. S., Conceição, K. C. S., Mazzieri, V. A., Reyes, P., Pieck, C. L., y Rangel, M. do C. (2012). Pt-Re-Ge/Al₂O₃ catalysts for n-octane reforming: Influence of the order of addition of the metal precursors. *Applied Catalysis A: General*, 419-420, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2012.01.023>
- Hu, E., Yao, Z., Zhao, L., Wu, Juan., Meng, H., Huo, L., y Li, Y., Characteristics of zeolite-modified NiMo/Al₂O₃ catalysts and their hydrotreating performance for light cycled oil. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2019, Vol 97, 5, 1107-1113. <https://doi.org/10.1002/cjce.23352>
- Choudary, N. V., y Newalkar, B. L. (2011). Use of zeolites in petroleum refining and petrochemical processes: Recent advances. *Journal of Porous Materials*, 18(6), 685-692. <https://doi.org/10.1007/s10934-010-9427-8>
- Chu, P., y Kuhl, G. H. (1987). Preparation of methyl tert-butyl ether (MTBE) over zeolite catalysts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 26 (2), 365-369. <https://doi.org/10.1021/ie00062a032>
- Corma, A., Corresa, E., Mathieu, Y., Sauvanaud, L., Al-Bogami, S., Al-Ghrami, M. S., y Bourane, A. (2017). Crude oil to chemicals: Light olefins from crude oil. *Catalysis Science & Technology*, 7(1), 12-46. <https://doi.org/10.1039/C6CY01886F>
- Corson, B. B. (1947). Industrial catalysis. *Journal of Chemical Education*, 24(2), 99. <https://doi.org/10.1021/ed024p99>
- Degnan, T. F. (2000). Applications of zeolites in petroleum refining. *Topics in Catalysis*, 13(4), 349-356. <https://doi.org/10.1023/A:1009054905137>

- Emam, E. A. (2013). *Clays as Catalysts in Petroleum Refining Industry*. *ARPN Journal of Science and Technology* 3(4).
- Feller, A., Guzman, A., Zuazo, I., y Lercher, J. A. (2004). On the mechanism of catalyzed isobutane/butene alkylation by zeolites. *Journal of Catalysis*, 224(1), 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2004.02.019>
- Feller, A., y Lercher, J. A. (2004). Chemistry and Technology of Isobutane/Alkene Alkylation Catalyzed by Liquid and Solid Acids. *Advances in Catalysis*, 48, 229-295. [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(04\)48003-1](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(04)48003-1)
- Free, G. (1942). *Catalytic cracking of middle oils with aluminum chloride*. <https://www.osti.gov/biblio/7296884>
- Gao, M., Zhang, G., Zhao, L., Gao, J., y Xu, C. (2023). Research Progress of Basic Catalyst Used in Catalytic Cracking for Olefin Production and Heavy Oil Utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(3), 1215-1226. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03939>
- Gault, F. G. (1981). Mechanisms of Skeletal Isomerization of Hydrocarbons on Metals. *Advances in Catalysis*, 30, 1-95. [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(08\)60325-9](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(08)60325-9)
- Gerzeliev, I. M., Temnikova, V. A., Maksimov, A. L., y Khadzhiev, S. N. (2018). Regeneration of Zeolite Catalyst for Isobutane Alkylation with Olefins. *Petroleum Chemistry*, 58(10), 827-832. <https://doi.org/10.1134/S0965544118100067>
- Goodwin Jr., J. G., Natesakhawat, S., Nikolopoulos, A. A., y Kim, S. Y. (2002). Etherification on Zeolites: MTBE synthesis. *Catalysis Reviews*, 44(2), 287-320. <https://doi.org/10.1081/CR-120003496>
- Harris, T. V., Driver, M., Elomari, S., y Timken, H.-K. C. (2008). *Alkylation process using an alkyl halide promoted ionic liquid catalyst*. USPatent No. US20080142413A1. <https://patents.google.com/patent/US20080142413A1>
- Hidalgo, J., Zbuzek, M., Černý, R., y Jiřa, P. (2014). Current uses and trends in catalytic isomerization, alkylation and etherification processes to improve gasoline quality. *Open Chemistry*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0354-9>
- Höchtel, M., Jentys, A., y Vinek, H. (2001). Isomerization of 1-pentene over SAPO, CoAPO (AEL, AFI) molecular sieves and HZSM-5. *Applied Catalysis A: General*, 207(1), 397-405. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00682-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00682-7)
- Hommelftoft, S. I. (2001). Isobutane alkylation: Recent developments and future perspectives. *Applied Catalysis A: General*, 221(1-2), 421-428. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00817-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00817-1)
- Jiao, F., Li, Jinjing, Pan, X., Xiao, J., Li, H., Ma, H., Wei, M., Pan, Y., Zhou, Z., Li, M., Miao, S., Li, Jian, Zhu, Y., Xiao, D., He, T., Yang, J., Qi, F., Fu, Q., y Bao, X. (2016). Selective conversion of syngas to light olefins. *Science*, 351(6277), 1065-1068. <https://doi.org/10.1126/science.aaf1835>
- Jumas, J.-C., Sougrati, M. T., Olivier-Fourcade, J., Jahel, A., Avenier, P., y Lacombe, S. (2013). Identification and quantification of Sn-based species in trimetallic Pt-Sn-In/Al₂O₃-Cl naphtha-reforming catalysts. *Hyperfine Interactions*, 217(1), 137-144. <https://doi.org/10.1007/s10751-012-0717-1>

- Magee, J. S., y Mitchell, M. M. (1993). *Fluid Catalytic Cracking: Science and Technology*. Elsevier.
- Oh, Y., Shin, J., Noh, H., Kim, C., Kim, Y.-S., Lee, Y. K., y Lee, J. K. (2019). Selective hydrotreating and hydrocracking of FCC light cycle oil into high-value light aromatic hydrocarbons. *Applied Catalysis A: General*, 577, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.03.004>
- Oloruntoba, A., Zhang, Y., y Hsu, C. S. (2022). State-of-the-Art Review of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst Regeneration Intensification Technologies. *Energies*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/en15062061>
- Primak, W. (1955). Kinetics of Processes Distributed in Activation Energy. *physical Review*, 100(6), 1677-1689. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.100.1677>
- Primo, A., y García, H. (2014). Zeolites as catalysts in oil refining. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7548-7561. <https://doi.org/10.1039/C3CS60394F>
- Sadeghbeigi, R. (2012). Chapter 1—Process Description. En R. Sadeghbeigi (Ed.), *Fluid Catalytic Cracking Handbook (Third Edition)* (pp. 1-42). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386965-4.00001-X>
- Sartipi, S., Parashar, K., Valero-Romero, M. J., Santos, V. P., van der Linden, B., Makkee, M., Kapteijn, F., y Gascon, J. (2013). Hierarchical H-ZSM-5-supported cobalt for the direct synthesis of gasoline-range hydrocarbons from syngas: Advantages, limitations, and mechanistic insight. *Journal of Catalysis*, 305, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2013.05.012>
- Satyanarayana, C. V., Srikant, D., y Gurav, H. R. (2016). Chapter 5—Catalyst Deactivation and Regeneration. En S. S. Joshi & V. V. Ranade (Eds.), *Industrial Catalytic Processes for Fine and Specialty Chemicals* (pp. 187-219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801457-8.00005-7>
- Speight, J. G. (2014a). Catalytic Cracking. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2014b). Hydrocracking. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2014c). Hydrotreating and Desulfurization. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2014d). Petrochemicals. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2014e). Product Improvement and Treating. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2014f). Refining Chemistry. En *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5.ª ed.). CRC Press.
- Tregubenko, V. Yu., Veretelnikov, K. V., y Belyi, A. S. (2019). Trimetallic Pt-Sn-Zr/γ-Al₂O₃ Naphtha-Reforming Catalysts. *Kinetics and Catalysis*, 60(5), 612-617. <https://doi.org/10.1134/S0023158419040190>
- Tregubenko, V. Yu., Vinichenko, N. V., Paukshtis, E. A., Udras, I. E., y Belyi, A. S. (2019). Investigation of Pt-Re/Al₂O₃-ZrO₂ catalysts for n-heptane reforming. *AIP Conference Proceedings*, 2141(1), 020015. <https://doi.org/10.1063/1.5122034>
- Vogt, E. T. C., y Weckhuysen, B. M. (2015). Fluid catalytic cracking: Recent developments

- on the grand old lady of zeolite catalysis. *Chemical Society Reviews*, 44(20), 7342-7370. <https://doi.org/10.1039/C5CS00376H>
- Voloch, M., Ladisch, M. R., y Tsao, G. T. (1986). Methyl t-butyl ether (MTBE) process catalyst parameters. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents, Selected Papers Presented at the Symposium on Progress in Ion Exchange Processes*, 4(2), 91-98. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(86\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0167-6989(86)90005-X)
- Wang, L., y Xiao, F.-S. (2014). The Importance of Catalyst Wettability. *ChemCatChem*, 6(11), 3048-3052. <https://doi.org/10.1002/cctc.201402437>
- Wisniak, J. (2000). Jöns Jacob Berzelius A Guide to the Perplexed Chemist. *The Chemical Educator*, 5(6), 343-350. <https://doi.org/10.1007/s00897000430a>
- Wisniak, J. (2010). The History of Catalysis. From the Beginning to Nobel Prizes. *Educación Química*, 21(1), 60-69. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30074-0](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30074-0)