

Nuevos Retos Operativos para la Industria de Refinación en México New Operative Challenges for the Oil Refining Industry in Mexico

F. Velázquez-Alonso ^{a,b}, E. Otazo-Sánchez ^a, M. Hernández-Juárez, ^a, J.R. Villagómez-Ibarra ^a
C.A. González-Ramírez ^{a*}, F. Vizcaíno-García^c

^aÁrea Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Hgo., 42184, México. cramirez@uaeh.edu.mx

^bDepartamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México Campus Pachuca, Carr. México-Pachuca km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hgo., C.P. 42080, México.

^cPetróleos Mexicanos, Subdirección de Producción de Petrolíferos, Refinería "Ing. Antonio M. Amor"

Resumen

Se estima que las emisiones anuales de gases tóxicos correspondientes al sector energético, incluyendo la industria de la refinación del petróleo son del 33%, por tal motivo, es importante implementar estrategias que mitiguen la emisión de Gases de Efecto Invernadero y al mismo tiempo se cumpla con la demanda energética. Normatividades aplicadas como la NOM-016-CRE-2016, para la calidad de combustibles petrolíferos han obligado al sector a considerar alternativas tecnológicas para mejorar la calidad de sus productos. Procesos como la hidrosulfuración y la reformación de naftas permiten la eliminación de compuestos azufrados y un aumento en el octanaje de los combustibles mejorando su calidad. Son muchos los retos a los que se enfrenta la industria de la refinación, siendo la operación hacia la sustentabilidad uno de los principales porque se relaciona con la implementación de estrategias y metodologías de simbiosis industrial que permitan identificar interacciones entre procesos e industrias para un mejor aprovechamiento de recursos brindando beneficios mutuos.

Palabras Clave:

Reformación; gasolina; octanaje; alternativas tecnológicas; calidad de combustibles.

Abstract

It has been estimated that the annual rate of toxic gas emissions from the energy sector, including oil refining industry, are of 33%, therefore, it is important to implement strategies for mitigating Greenhouse Effect Gas Emissions and, at the same time, fulfill the energy demand. Current regulations, such as NOM-016-CRE-2016 about the quality of oil fuels, have compelled the energy sector to take into consideration technological alternatives, in order to improve products quality. Processes, such as hydrodesulfurization and naphtha reforming allow elimination of sulfur compounds as well as increase of the octane number in fuels, improving their quality. There are several challenges that the refining industry has to face, being the sustainable operativity one of the most important, due to its relationship with the implementation of strategies and industrial symbiosis methodologies that allow identification of interactions between processes and industries for a better utilization of resources, bringing up mutual benefits.

Keywords:

Reforming; gasoline; octane number; technological alternatives; fuel quality.

1. Introducción

Diversos países se han centrado en prevenir la contaminación, estableciendo programas gubernamentales para reducir el nivel de las emisiones provenientes de los procesos industriales en los sectores energético y de transporte.

Actualmente, la gasolina y el diésel se consideran como los principales combustibles que mueven el transporte terrestre de personas y mercancías; de modo que resulta inevitable su uso. Esta problemática ha motivado la búsqueda de combustibles de mayor

calidad, que cumplan con las normatividades establecidas para el cuidado de la salud y del ambiente. En México, el 29 de agosto del 2016 se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, en la que se establecen las especificaciones de calidad de los productos petrolíferos. El desarrollo de nuevas tecnologías, o bien, la reconfiguración de los procesos actuales en la industria de la refinación petrolera, permiten producir combustibles que disminuyan las emisiones atmosféricas de compuestos contaminantes.

1.1. La industria de la refinación

*Autor para la correspondencia: cramirez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: cramirez@uaeh.edu.mx (César A. González-Ramírez), ve145167@uaeh.edu.mx (Fabiola Velázquez-Alonso), profe_4339@uaeh.edu.mx (Elena María Otazo-Sánchez), martin_hernandez@uaeh.edu.mx (Martín Hernández-Juárez), jrvi@uaeh.edu.mx (José Roberto Villagómez-Ibarra), fidel.vizcaino@pemex.com (Fidel Vizcaíno-García)

La industria de la refinación del petróleo juega un papel importante, dado que la mayoría de sus productos se incorporan al mercado energético, generando impactos significativos en la economía mundial.

El petróleo, también conocido como crudo, se define como una mezcla compleja constituida principalmente de compuestos basados en elementos, tales como: carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y algunos metales.

Actualmente, en la mayoría de los países se requiere producir combustibles con menores concentraciones de contaminantes como el azufre y algunos compuestos aromáticos, esto implica la necesidad de convertir o reconfigurar las unidades de proceso ya instaladas para producir combustibles de mayor calidad que cumplan con el marco normativo vigente (Fahim, Alshahaf, & Elkilani, 2010).

Una refinera convencional se define como una planta industrial que tiene como función principal obtener productos, a partir de una alimentación de crudo, integrando diferentes procesos físicos y químicos, tales como: destilación, extracción, reformación, hidrogenación y craqueo; para convertir el crudo en productos de mayor valor (Babich & Moulijn, 2003). Existen diversos los factores que influyen para que los procesos de refinación se encuentren en constante evolución (ver Figura 1) para satisfacer las necesidades y regulaciones ambientales estipuladas.

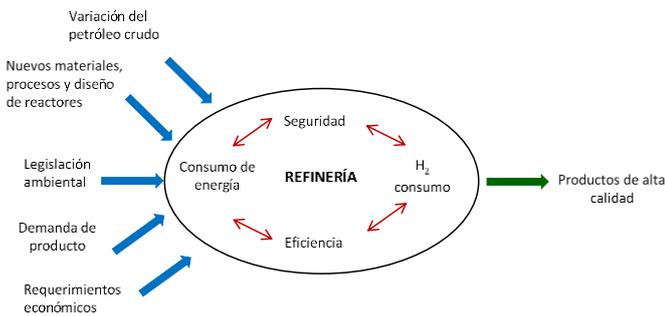


Figura 1. Factores que influyen en la configuración de una refinera (Babich & Moulijn, 2003)

1.2. Procesos de transformación

La industria de la refinación integra de diferentes unidades de proceso, dando lugar a un sistema de producción, como se muestra en la Figura 2.

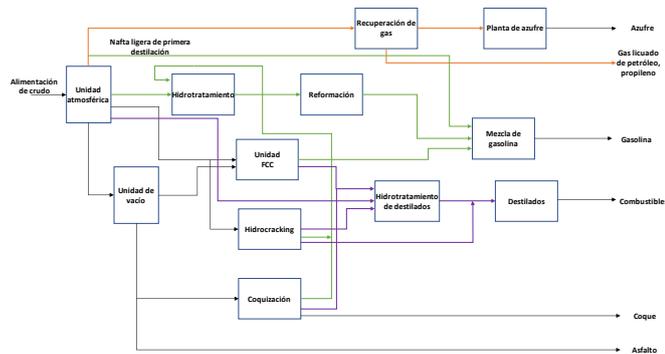


Figura 2. Esquema general de refinación (Oyekan, 2019).

El procesamiento del crudo inicia después de su extracción, y almacenamiento en una refinera, teniendo como paso previo un proceso de desalado para después iniciar las etapas de destilación atmosférica y de vacío, así como con las siguientes fases del proceso que son determinadas de acuerdo a la composición y características físicas y químicas del crudo, así como de los productos derivados que pueden obtenerse (Speight, 2011a).

Los procesos integrados de refinación son clasificados por su tipo y objetivo de producción, pueden ser de separación física y química o de transformación química (Fahim et al., 2010), en la Tabla 1 se enlistan los principales procesos en una refinera. Es importante mencionar que la selección y configuración de las unidades de procesamiento dependen de cada refinera.

Tabla 1. Clasificación de los procesos de refinación (Fahim et al., 2010)

Procesos de Separación Física y Química	Procesos de Transformación	
	Catalítica	Térmica
Destilación	Reformación	Coquización retardada
Extracción	Hidrotratamiento	Reducción de viscosidad
Desasfaltado	Hidrocrackeo	
Separación de gases	Alquilación	
	Isomerización	

1.3. Calidad de los productos de refinación

Desde el punto de vista ambiental, el azufre es considerado un elemento no deseado en los combustibles, debido a que incrementa la emisión de gases tóxicos que, en forma de anhídridos, reaccionan con el agua provocando la lluvia ácida, por lo que, en la industria de la refinación, existen procesos que permiten procesar una mayor proporción de crudos con diferentes niveles de azufre y así obtener una mejor calidad en sus productos reduciendo el contenido sulfurado.

El consumo de combustibles derivados del petróleo es una de las causas del cambio climático, ocasionando un problema mundial por las emisiones generadas, tanto en los procesos de producción como en el uso como fuente de energía y de transporte (Liu et al., 2020).

A pesar de que usar combustibles fósiles tiene desventajas, debido al daño que se causa al ambiente, aún se consideran la mayor fuente energética en el mundo. Actualmente, la regulación ambiental exige la producción de combustibles limpios.

Los nuevos retos, en este tipo de procesos, incluyen el mejoramiento de prácticas operativas que permitan la disminución en el contenido de azufre y un aumento en el número de octano, con lo que es posible cumplir con la normatividad vigente (NOM-016-CRE-2016) para mejorar la calidad de combustibles. En las Tablas 2 y 3, se enlistan algunas especificaciones de las gasolinas.

Tabla 2. Especificaciones de gasolinas (Energía, 2016)

Propiedad	Unidad	Gasolina	
		Premium	Regular
Número de Octano		94	
Índice de octano		91 mínimo	87 máximo
Azufre	ppm	80 mínimo	80 mínimo
Olefinas		11.4 mínimo	11.4 mínimo
Aromáticos	% vol	31.1 mínimo	31.1 mínimo
Oxigenante		5.8 etanol u	

11.9 MTBE

ppm: partes por millón, MTBE: Metil ter-butil éter

Tabla 3. Especificaciones de gasolina por región (Energía, 2016)

Propiedad	Unidad	Zonas			
		ZMVM	ZMG	ZMM	Resto del país
		GP y GR		GP	GR
Aromáticos	% vol	25		32	ND
Olefinas	% vol	10		12.5	ND
Benceno	% vol	1.0		2.0	
Azufre	ppm	30 promedio 80 máximo			

GP: Gasolina Premium; GR: Gasolina Regular; ZMVM: zona Metropolitana del Valle de México; ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara; ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

2. Procesos que operan con corrientes ligeras-intermedias

Las unidades de procesamiento de crudo tienen la tarea principal de separar el crudo en diferentes fracciones, que posteriormente son purificadas para convertirlas en productos satisfactorios de las necesidades humanas (Al-Qahtani & Elkamel, 2010), en la Tabla 4 se mencionan algunas fracciones petrolíferas, su punto de ebullición (P.E.), su proceso de transformación y el producto obtenido.

Tabla 4. Ejemplos de productos petrolíferos (Speight & Baki, 2002)

Fracción	P. E. (°C)	Proceso	Producto
Propano	-40	Destilación	Gas LP
Naftas	Ligera 30-90	Reformación Catalítica	Gasolina
	Intermedia 90-150	Reformación Catalítica	Gasolina
	Pesada 150-205	Craqueo Catalítico (FCC)	Gasolina catalítica
Gasóleo	Ligero 260-315	Hidrotratamiento (HDT)	Diesel
	Pesado 315-425		
	De vacío 425-600		
Residuos	>600		

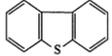
2.1. Hidrodesulfuración (HDS)

Un proceso de hidrotratamiento tiene como objetivo la remoción de impurezas en los hidrocarburos, tales como; compuestos azufrados, nitrógeno, oxígeno y algunos metales pesados, mediante la adición de una corriente fresca de hidrógeno que reaccionará con la corriente de hidrocarburo en presencia de un catalizador a altas presiones y temperaturas (Speight, 2011), en la Figura 3 se muestra una planta de hidrotratamiento instalada en una refinería.

Los componentes azufrados son algunos de los más abundantes en el crudo mexicano, provocando la emisión de gases tóxicos que además de ser perjudiciales para la salud, también afectan la vida útil de los catalizadores empleados en los automotores, disminuyendo la calidad de los productos obtenidos, por lo que su remoción es de suma importancia para el

mejoramiento de los procesos y productos de la refinación (Saleh, 2020), algunos compuestos azufrados se mencionan en la Tabla 5.

**Figura 3. Planta de hidrotratamiento a nivel industrial****Tabla 5. Principales compuestos azufrados (Babich & Moulijn, 2003)**

Compuesto	Estructura química
Mercaptanos	R-S-H
Sulfuros	R ¹ -S-R ²
Disulfuros	R ¹ -S-S-R ²
Tiofeno	
Benzotiofeno	
Dibenzotiofeno	

R¹ y R² corresponden a radicales alquilo

En los procesos de hidrotratamiento, el hidrógeno alimentado reacciona con la materia prima (nafta o gasóleo) que inicia con altas concentraciones de azufre y produce sulfuro de hidrógeno (H₂S), obteniendo una corriente de hidrocarburos desulfurados, es decir con un menor contenido de compuestos azufrados (Speight, 2011b), las condiciones operativas, del proceso se muestran en la Tabla 6 y en la Figura 4.

Tabla 6. Condiciones del proceso de HDS de naftas (Speight, 2011b)

Parámetro (Unidades)	Valor
Temperatura (°C)	300-400
Presión (atm)	35-70
LHSV (h ⁻¹)	40-10
Velocidad de recirculación de hidrógeno (ft ³ /barril)	400-1000
Vida útil del catalizador (años)	3-10
Remoción de azufre (%)	99.9

La Hidrodesulfuración (HDS) se emplea como un proceso de hidrotratamiento preparativo y previo a la Reformación Catalítica de Naftas (RCN), debido a que en este último se requiere una

alimentación de naftas con concentraciones menores a 20 ppm de azufre.

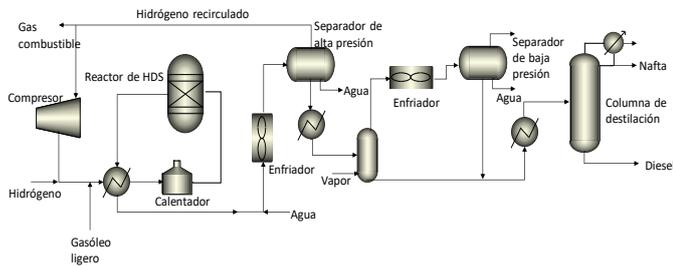


Figura 4. Diagrama del proceso de hidrodesulfuración (Bathrinath et al., 2021).

2.2. Reformación Catalítica de Naftas (RCN)

La Figura 5 es la fotografía de una planta industrial de RCN, para el proceso de regeneración continua del catalizador (CCR), dicho proceso es clave para la producción de combustibles ricos en compuestos aromáticos y de alto octanaje. En esta transformación se incrementa el número de octano, el cual se define como una medida directa de la capacidad antidetonante de las gasolinas, permitiendo una mayor eficiencia de la combustión y disminuyendo la sobrepresión en los automotores.



Figura 5. Planta de Reformación Catalítica de Naftas (CCR)

Se define la nafta como una fracción del petróleo constituida por una mezcla de hidrocarburos con cadenas de 5 a 12 carbonos, tales como Parafinas (P), Olefinas (O), Naftenos (N) y Aromáticos (A) (Rahimpour, Jafari, & Iranshahi, 2013). Por varios años se han realizado diversas investigaciones con la finalidad de lograr mejoras operativas en el proceso, enfocadas en:

1. Desarrollo de nuevos catalizadores.
2. Desarrollo de modelos cinéticos.
3. Estudios de desactivación en los catalizadores de reformación.
4. Modelación, simulación y optimización del proceso.

5. Estudios para determinar la influencia de las variables operativas.

El desarrollo tecnológico en los procesos de reformación comienza a partir del año 1940 cuando Vladimir Hansel creó el primer proceso de reformación de naftas en presencia de un catalizador de platino. Fue hasta el año 1949 cuando se implementó este tipo de procesos a escala industrial para la obtención de gasolinas de alto octanaje, bajo la dirección de la empresa Universal Oil Products (UOP), quienes denominaron al proceso “*Platforming*” (Samimi, Zarinabadi, Kootenaee, Azimia, & Mirzaeia, 2020).

Diversas configuraciones del proceso se definen con base en el tipo de catalizador y la frecuencia de su regeneración, por lo tanto, podemos encontrar los procesos de regeneración continua (CCR), regeneración cíclica (CR) y semi-regenerativo (SR), todos así definidos por sus siglas en inglés y se describen a continuación.

La configuración SR es una de las más utilizadas, consta de 3 o 4 reactores conectados en serie y de lecho fijo, este tipo de proceso se caracteriza por tener una operación continua por largos periodos (6 a 24 meses), incrementando la deposición de coque en el catalizador y, por ende, disminuye su actividad. Una vez finalizando un ciclo de operación es necesario realizar un paro en el proceso, para posteriormente, en una unidad adicional, llevar a cabo la regeneración del catalizador. Los principales factores que intervienen para determinar el término de un ciclo operativo tienen que ver con la manipulación de las variables operativas, tales como temperatura y presión. Diversos estudios han determinado que una operación a altas presiones disminuye la deposición de coque en los catalizadores (Rahimpour et al., 2013). Un esquema general del proceso SR se muestra en la Figura 6.

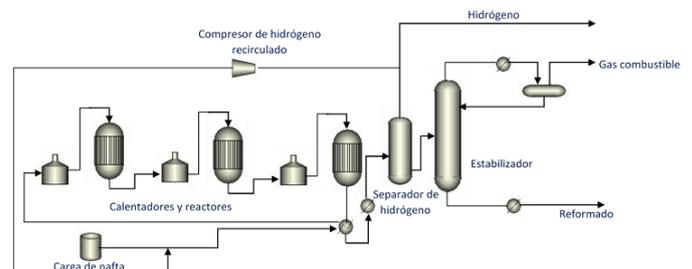


Figura 6. Diagrama del proceso SR de Reformación de Naftas (Yusuf, John, Aderemi, Patel, & Mujtaba, 2020)

El proceso CCR (Figuras 5 y 7) es considerado uno de los más modernos para la reformación de naftas, consta de 3 o 4 reactores de lecho fluidizado conectados uno sobre otro, dando lugar a una regeneración continua del catalizador. Una de las ventajas de este tipo de proceso se relaciona con la calidad del producto reformado, debido a que su configuración permite operar con naftas de baja calidad para obtener naftas reformadas con un alto número de octano, entre 95 y 108 (Jafari et al., 2013).

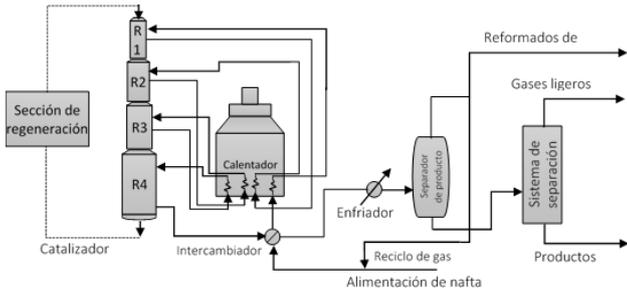


Figura 7. Diagrama del proceso CCR de Reformación de Naftas (Weifeng, Hongye, Shengjing, & Jian, 2007).

Como en todo proceso catalítico, una parte fundamental son las reacciones que intervienen en la transformación de reactivos a productos, para el caso específico de la RCN, y acorde con el objetivo principal de obtener gasolina de alto octanaje, las principales reacciones del proceso se ejemplifican en la Tabla 7.

Tabla 7. Principales reacciones de RCN (Ciapetta & Wallace, 1972)

Nombre	Reacción
Deshidrogenación de ciclohexano a benceno	<chem>C1=CCCCC1 <=> C1=CC=CC=C1 + 3H2</chem> Ciclohexano → Benceno + 3H ₂
Deshidroisomerización de alquilciclopentanos en aromáticos	<chem>CC1=CCCC1 <=> C1=CC=CC=C1 + 3H2</chem> Metil-ciclopentano → Benceno + 3H ₂
Isomerización de parafinas	<chem>CCCC <=> CC(C)C</chem> n-butano → 2-Metil-butano
Deshidroclicación de parafinas en aromáticos	<chem>CCCCCC <=> C1=CC=CC=C1 + 4H2</chem> n-hexano → Benceno + 4H ₂
Hidro cracking de hidrocarburos	<chem>CC(C)CC(C)C <=> CC(C)C</chem> 2,2,4-trimetil-pentano → iso-butano

La reformación, además de ser un proceso en el que se producen gasolinas de alto octanaje, también puede usarse para obtener productos aromáticos de valor para la industria petroquímica, adicionalmente, es importante mencionar que la RCN genera hidrógeno como subproducto. Este proceso requiere catalizadores constituidos por metales, tales como: platino, renio, estaño o germanio, soportados en un medio ácido. En la Figura 8 se enlista, de forma cronológica, el desarrollo de los principales catalizadores empleados.

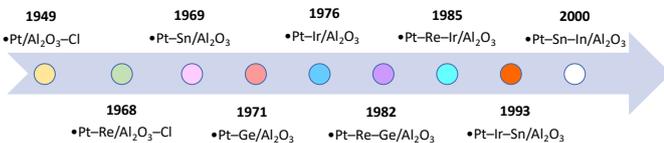


Figura 8. Evolución de los catalizadores de reformación (Rahimpour et al., 2013)

Generalmente, los catalizadores usados en la reformación de naftas son de tipo monometálico, bimetálico o trimetálico, sobre un soporte de alúmina. En la Figura 9 se representa, de manera esquemática, la interfase Pt/ γ -Al₂O₃, en la que se observa el platino adherido a los átomos de aluminio y oxígeno. De igual forma, en la Figura 9, se presenta una representación de la superficie de un catalizador de Pt (3 % en peso) / γ -Al₂O₃.

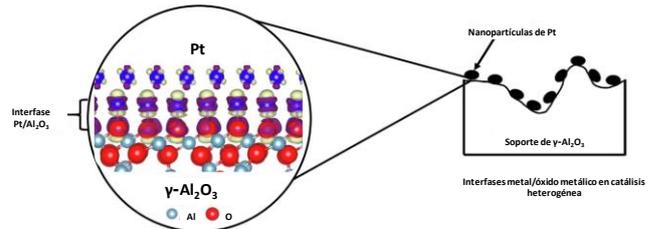


Figura 9. Estructura de la interfase Pt/ γ -Al₂O₃ (Oware Sarfo, Clauser, Santala, & Árnadóttir, 2021)

3. Hacia la excelencia Operativa

A lo largo de los años, han surgido diversas investigaciones relacionadas con el proceso de Reformación Catalítica de Naftas, las cuales involucran el desarrollo de nuevos modelos cinéticos, así como la simulación y optimización del proceso orientadas hacia la excelencia operativa, de tal forma que, al incrementar la eficiencia y mejorar la calidad del producto, se genere menor cantidad de emisiones contaminantes durante el uso de combustibles fósiles en automotores, disminuyendo así el impacto ambiental de manera significativa (Abdellatif et al., 2021).

Una relación importante entre el modelamiento y la optimización del proceso se refleja en la investigación realizada por (Zainullin, Zagoruiko, Koledina, Gubaidullin, & Faskhutdinova, 2020), en la que desarrollaron un modelo matemático considerando los cambios en la temperatura y en la velocidad de flujo, así como en la composición de la nafta alimentada; para determinar la composición de los compuestos aromáticos producidos y analizar la influencia del benceno en el número de octano.

3.1. Retos en simulación y optimización con un enfoque de sustentabilidad operativa

Los retos fundamentales de los procesos de refinación se centran en lograr una operación enfocada a la sustentabilidad, mediante la integración de objetivos, tales como: la recuperación de azufre, el incremento de la vida útil de los catalizadores empleados, el tratamiento de residuos, la minimización de emisiones, la integración energética, la recirculación de agua y la minimización de los problemas por corrosión en los equipos. Un resumen de las investigaciones realizadas mediante modelación, simulación y optimización del proceso de reformación catalítica de naftas, se enlistan en la Tabla 8.

Tabla 8. Principales aportaciones en la simulación y optimización del proceso de reformación catalítica de naftas.

Aportación	Variable optimizada	Referencia
Optimización híbrida RCN, isomerización de nafta ligera	RON _{max} = 95 T _{isomerización} =110 °C	(Duchêne, Mencarelli, & Pagot, 2020)
Optimización en planta piloto	T=516 °C P=1.4Mpa LHSV=2.3 ^{h-1}	(Wang et al., 2018)
Simulación CFD de reactores de reformación.	NA	(Mustafa, Ahmad, Ahsan, & Kano, 2017)
Simulación y optimización en Aspen Hysys para producción de aromáticos e hidrógeno	T=540 °C	(Jonathan Otaraku, 2017)
Análisis de la producción de hidrógeno en RCN como energía sustentable	NA	(Hienuki, 2017)
Red neuronal artificial recurrente en capas (ANN) mediante método	RON _{max} = 98	(Sadighi & Mohaddecy, 2013)

de retropropagación para la simulación RCN		
Modelo cinético de 27 lumps. Producción de aromáticos, validado por simulación	T _{sal1} =418°C T _{sal1} =462°C T _{sal1} =489°C T _{sal1} =505°C K _{gcoque en cat} =0.061	(Hongjun, Mingliang, Huixin, Zeji, & Hongbo, 2010)
Optimización multiobjetivo de un proceso industrial de RCN	Top=520 -530 °C Aromáticos aumentaron 0.18 % masa Disminución de benceno 1.77 % masa	(Hou, Su, Mu, & Chu, 2007)

Los nuevos retos en las refinerías se centran en el mejoramiento de la calidad de los productos de la refinación, mediante la remoción de azufre, nitrógeno, metales pesados, aumento en el número de octano en gasolinas e índice de cetano en diesel, disminución del contenido de benceno y alcanzar una producción sostenida y suficiente de combustibles de ultra bajo azufre (UBA), suministrando a la sociedad los combustibles limpios que requiere para su desarrollo sostenible. Las principales tecnologías para alcanzar los objetivos de producción, incluyen los procesos de: hidrosulfuración selectiva, hidrosulfuración profunda, coquización para incrementar la producción de combustibles (proyectos de fondo de barril), procesos de recuperación de hidrógeno y de compuestos aromáticos obtenidos de la reformación catalítica, tales como: Benceno, Tolueno y Xileno (BTX) (Li, 2013).

El objetivo de la recuperación de hidrógeno se centra en el uso de hidrógeno como un combustible limpio y una fuente alterna de energía que podría reducir el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles, esta es la razón principal por la que es necesario enfocar nuevos estudios que profundicen el análisis técnico y económico de los procesos de producción y recuperación de hidrógeno, permitiendo crear futuros proyectos basados en la economía del hidrógeno, para reducir costos de producción y obtener un combustible más barato, sostenible y eficiente (Yukesh Kannah et al., 2021).

Otro aspecto importante, enfocado hacia la sustentabilidad, se relaciona con la implementación de estrategias y metodologías para la promoción de la simbiosis industrial (SI) al interior y entre las refinerías y sus industrias asociadas, la SI consiste, básicamente, de constituir una serie de entradas y salidas de una industria en términos energéticos, de materiales y de servicios, que sirvan como base para la identificación de necesidades con otras industrias, buscando el uso eficiente de la energía y la reutilización de residuos diversos (Cervo, Ferrasse, Descales, & Van Eetvelde, 2020).

4. Perspectivas

Siendo el proceso de RCN uno de los más importantes para la producción de combustibles, se han realizado diversas investigaciones relacionadas con el desarrollo, caracterización y evaluación de nuevos catalizadores, así como la modelación, simulación y optimización del proceso operativo, sin dejar de lado el análisis de modelos cinéticos que permitan una mejor descripción del proceso catalítico.

Una tendencia actual en la reformación catalítica de naftas es la disminución de los hidrocarburos aromáticos indeseados y listados en las nuevas normativas ambientales, como es el caso del benceno, que debe reducirse manteniendo, a la vez, un índice de

octano alto, para no disminuir la calidad de la gasolina. En la actualidad, la producción de gasolina reformulada con bajo contenido de benceno es uno de los principales desafíos en la industria de combustibles para el transporte.

Es importante mencionar que, en el proceso se produce un alto porcentaje de aromáticos que pueden ser utilizados en la industria petroquímica, algo similar ocurre con las olefinas para la producción de plásticos amigables con el ambiente. Otro de los subproductos de la reformación es el hidrógeno, que también puede ser una alternativa energética, de la cual hasta el momento faltan investigaciones para determinar su máxima eficiencia en producción y calidad.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada.

Referencias

- Abdellatif, T. M. M., Ershov, M. A., Kapustin, V. M., Ali Abdelkareem, M., Kamil, M., & Olabi, A. G. (2021). Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review. *Fuel*, 291. doi:10.1016/j.fuel.2020.120112
- Al-Qahtani, K. Y., & Elkamel, A. (2010). *Planning and Integration of Refinery and Petrochemical Operations* (1 ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Babich, I. V., & Moulijn, J. A. (2003). Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review. *Fuel*, 82(6), 607-631. doi:10.1016/S0016-2361(02)00324-1
- Bathrinath, S., Abuthakir, N., Koppiahraj, K., Saravanasankar, S., Rajpradeesh, T., & Manikandan, R. (2021). An initiative towards sustainability in the petroleum industry: A review. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2021.02.330
- Cervo, H., Ferrasse, J.-H., Descales, B., & Van Eetvelde, G. (2020). Blueprint: A methodology facilitating data exchanges to enhance the detection of industrial symbiosis opportunities – application to a refinery. *Chemical Engineering Science*, 211, 115254. doi:10.1016/j.ces.2019.115254
- Ciapetta, F. G., & Wallace, D. N. (1972). Catalytic naphtha reforming. *Catalysis Reviews*, 5(1), 67-158. doi:10.1080/01614947208076866
- Duchêne, P., Mencarelli, L., & Pagot, A. (2020). Optimization approaches to the integrated system of catalytic reforming and isomerization processes in petroleum refinery. *Computers & Chemical Engineering*, 141. doi:10.1016/j.compchemeng.2020.107009
- Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos., (2016).
- Fahim, M. A., Alsahhaf, T. A., & Elkilani, A. (2010). Chapter 1 - Introduction. In M. A. Fahim, T. A. Alsahhaf, & A. Elkilani (Eds.), *Fundamentals of Petroleum Refining* (pp. 1-9). Amsterdam: Elsevier.
- Hienuki, S. (2017). Environmental and socio-economic analysis of naphtha reforming hydrogen energy using input-output tables: A case study from Japan. *Sustainability (Switzerland)*, 9(8), 1376. doi:10.3390/su9081376
- Hongjun, Z., Mingliang, S., Huixin, W., Zeji, L., & Hongbo, J. (2010). Modeling and simulation of moving bed reactor for catalytic naphtha reforming. *Petroleum Science and Technology*, 28(7), 667-676. doi:10.1080/10916460902804598
- Hou, W., Su, H., Mu, S., & Chu, J. (2007). Multiobjective optimization of the industrial naphtha catalytic reforming process. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(1), 75-80. doi:10.1016/S1004-9541(07)60036-6
- Jafari, M., Rafiei, R., Amiri, S., Karimi, M., Iranshahi, D., Rahimpour, M. R., & Mahdiyari, H. (2013). Combining continuous catalytic regenerative naphtha reformer with thermally coupled concept for improving the process yield. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 10327-10344. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.06.039
- Jonathan Otaraku, I. (2017). Optimization of Hydrogen Production from Nigerian Crude Oil Samples Through Continuous Catalyst Regeneration (CCR) Reforming Process Using Aspen Hysys. *American Journal of Applied Chemistry*, 5(5). doi:10.11648/j.ajac.20170505.11
- Li, D. (2013). Crucial technologies supporting future development of petroleum refining industry. *Chinese Journal of Catalysis*, 34(1), 48-60. doi:10.1016/s1872-2067(11)60508-1

- Liu, Y., Lu, S., Yan, X., Gao, S., Cui, X., & Cui, Z. (2020). Life cycle assessment of petroleum refining process: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 256. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120422
- Mustafa, J., Ahmad, I., Ahsan, M., & Kano, M. (2017). Computational fluid dynamics based model development and exergy analysis of naphtha reforming reactors. *International Journal of Exergy*, 24(2-4), 344-363. doi:10.1504/IJEX.2017.087696
- Oware Sarfo, K., Clauser, A. L., Santala, M. K., & Árnadóttir, L. (2021). On the atomic structure of Pt(111)/ γ -Al₂O₃(111) interfaces and the changes in their interfacial energy with temperature and oxygen pressure. *Applied Surface Science*, 542, 148594. doi:10.1016/j.apsusc.2020.148594
- Rahimpour, M. R., Jafari, M., & Iranshahi, D. (2013). Progress in catalytic naphtha reforming process: A review. *Applied Energy*, 109, 79-93. doi:10.1016/j.apenergy.2013.03.080
- Sadighi, S., & Mohaddecy, R. S. (2013). Predictive modeling for an industrial naphtha reforming plant using artificial neural network with recurrent layers. *International Journal of Technology*, 4(2), 102-111. doi:10.14716/ijtech.v4i2.106
- Saleh, T. A. (2020). Characterization, determination and elimination technologies for sulfur from petroleum: Toward cleaner fuel and a safe environment. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 25. doi:10.1016/j.teac.2020.e00080
- Samimi, A., Zarinabadi, S., Kootenaeei, A. H. S., Azimia, A., & Mirzaeia, M. (2020). Kinetic Overview of Catalytic Reforming Units (Fixed and Continuous Reforming). *Chemical Methodologies*, 4, 245-257. doi:10.33945/SAMI/CHEMM.2020.3.3
- Speight, J. G. (2011a). Chapter 2 - Refining Processes. In J. G. Speight (Ed.), *The Refinery of the Future* (pp. 39-80). Boston: William Andrew Publishing.
- Speight, J. G. (2011b). Chapter 8 - Hydrotreating and Desulfurization. In J. G. Speight (Ed.), *The Refinery of the Future* (pp. 237-273). Boston: William Andrew Publishing.
- Speight, J. G., & Baki, Ö. (2002). *Petroleum Refining Processes*. Basel, Switzerland: Marcel Dekker, Inc.
- Wang, L., Li, D., Han, F., Zhu, Y., Zhang, M., & Li, W. (2018). Experimental optimization and reactor simulation of coal-derived naphtha reforming over Pt-Re/ γ -Al₂O₃ using design of experiment and response surface methodology. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 125(1), 245-269. doi:10.1007/s11144-018-1403-3
- Weifeng, H., Hongye, S., Shengjing, M., & Jian, C. (2007). Multiobjective Optimization of the Industrial Naphtha Catalytic Reforming Process* * Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.60421002). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(1), 75-80. doi:10.1016/S1004-9541(07)60036-6
- Yukesh Kannah, R., Kavitha, S., Preethi, Parthiba Karthikeyan, O., Kumar, G., Dai-Viet, N. V., & Rajesh Banu, J. (2021). Techno-economic assessment of various hydrogen production methods - A review. *Bioresour Technol*, 319, 124175. doi:10.1016/j.biortech.2020.124175
- Yusuf, A. Z., John, Y. M., Aderemi, B. O., Patel, R., & Mujtaba, I. M. (2020). Effect of hydrogen partial pressure on catalytic reforming process of naphtha. *Computers and Chemical Engineering*, 143. doi:10.1016/j.compchemeng.2020.107090
- Zainullin, R. Z., Zagoruiko, A. N., Koledina, K. F., Gubaidullin, I. M., & Faskhutdinova, R. I. (2020). Multi-Criterion Optimization of a Catalytic Reforming Reactor Unit Using a Genetic Algorithm. *Catalysis in Industry*, 12(2), 133-140. doi:10.1134/s2070050420020129