

¿Qué le pasa a mi auto? What happens to my car?

Juárez-Plata, A.Y.^a , Otazo-Sánchez, E.M.^a , González-Ramírez, C.A.^{a*} 

^a Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo, km. 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hgo., C.P. 42184, MÉXICO

Resumen

Es probable que quienes han conducido un vehículo automotriz hayan detectado ruidos anormales en el motor, semejantes a pequeñas explosiones en el interior. Efectivamente, los vehículos de encendido por chispa suelen experimentar *detonaciones prematuras* en el pistón, lo que resulta severamente perjudicial para los componentes internos del motor y reduce su rendimiento. Este fenómeno está directamente relacionado con la *calidad del combustible* suministrado, que, entre otros factores, está determinado por el octanaje. A mayor *número de octano*, mayor será la eficiencia en el motor y menor será su daño. En el presente trabajo se describe el proceso de reformación catalítica, con el cual se incrementa el número de octano de la gasolina, así como la importancia de optimizar dicho proceso para el cuidado del motor y del medio ambiente.

Palabras Clave:

Antidetonantes, número de octano, calidad de la gasolina, nafta, reformación catalítica, catalizador

Abstract

Those who have driven a motor vehicle have likely detected abnormal engine noises, similar to small explosions inside. Indeed, spark ignition vehicles often experience premature detonation of the piston, which is severely detrimental to the internal components of the engine and reduces its performance. This phenomenon is directly related to the quality of the fuel supplied, which, among other factors, is determined by the octane number. The higher the octane number, the higher the gasoline quality and the lower the engine damage. In this work, the catalytic reform process is described, with which the octane number of fuels is increased, and the importance of optimizing said process, both for the care of the engine and the environment.

Keywords:

Anti-knock, octane number, gasoline quality, naphtha, catalytic reforming, catalyst.

1. Introducción

Al viajar en automóvil es probable experimentar diversas situaciones que no corresponden al funcionamiento normal del vehículo, tales como ruidos o martilleos en las partes internas del motor (Chen, Pal et al. 2020). Este acontecimiento es comúnmente conocido como “golpeteo”, y su aparición causa daños importantes en las piezas internas del motor, por lo que resulta de suma importancia conocer la causa que lo genera y las alternativas de solución.

1.1. La combustión

En un motor de cuatro tiempos, la combustión se realiza en cuatro pasos o desplazamientos del pistón, lo que completa un

ciclo. La Figura 1 ilustra el proceso mencionado en el pistón. En el tiempo de admisión, el pistón se desplaza hacia abajo permitiendo la entrada de la mezcla combustible-aire. Posteriormente, la mezcla es comprimida, conocido como tiempo de compresión. La quema de la mezcla es iniciada por una chispa de la bujía, dando lugar al tiempo de expansión. Finalmente, la válvula de escape es abierta, el pistón es desplazado hacia arriba reduciendo la presión y comienza el tiempo de expulsión (Hougen, Watson et al. 2005).

El combustible más utilizado para los vehículos de encendido por chispa es la gasolina, que es una mezcla compleja de hidrocarburos de entre 4 y 12 átomos de carbono que se encuentra en fase líquida en condiciones ambientales y presenta alta volatilidad (Muñoz and Rovira 2014). La gasolina es un producto

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

Correo electrónico: allinjuarezplata@gmail.com (Allin Y. Juárez Plata), profe_4339@uaeh.edu.mx (Elena M. Otazo Sánchez), cramirez@uaeh.edu.mx (César A. González Ramírez)

obtenido del fraccionamiento del petróleo que se colecta en el intervalo de temperatura de la destilación entre 30 y 200 °C.

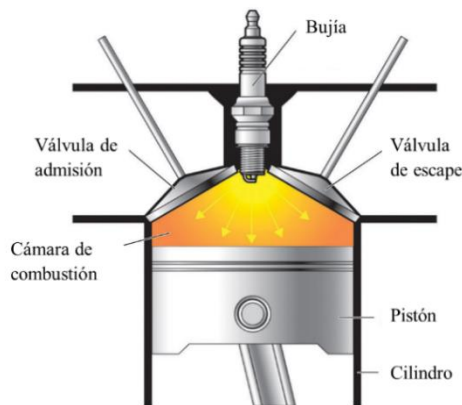
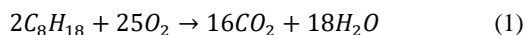


Figura 1. Proceso de combustión de la gasolina en un motor de combustión interna (Kennepohl 2019).

Los principales componentes de la gasolina son las parafinas o hidrocarburos de cadena lineal, (7% – 9%), isoparafinas o hidrocarburos ramificados (38% – 39%), compuestos aromáticos (43% – 44%), naftenos (3% – 4%) y olefinas (5% - 6%) (Castañeda, Jorge et al. 2019). Existen en la actualidad modelos matemáticos que permiten la predicción de la composición de la gasolina al finalizar su proceso de producción, los cuales modelan la composición de la materia prima según el tipo de catalizadores empleados durante el proceso y el tiempo de contacto (Chuzlov, Nazarova et al. 2019).

El hidrocarburo principal de la gasolina es el isooctano (2,2,4-trimetilpentano), cuya reacción de combustión está representada en la ecuación 1.



1.2. El golpeteo

Los términos “golpeteo” o “cascabeleo” son utilizados con frecuencia para referirse a los ruidos anormales provenientes de los pistones de un motor de combustión interna. Pero, ¿a qué se debe dicho fenómeno? A continuación, la explicación.

La combustión de un vehículo de encendido por chispa es un proceso que se lleva a cabo dentro del cilindro del motor. La mezcla combustible-aire se comprime para ser introducida en el cilindro ejerciendo presión de forma gradual. Con el aumento de la presión y de la temperatura, cierta porción de la gasolina que no ha sido combustionada tiende a detonar o explotar antes de que la chispa genere la combustión (Wang, Liu et al. 2017). Este proceso de autoignición genera el golpeteo en el motor, causando severos daños en la parte interna del motor, incluso, puede causar la rotura de algunas piezas, como las válvulas. Otra consecuencia de la autoignición es la deficiencia energética y bajo rendimiento del combustible (Crouse 1993). En la Figura 2 se observa el fenómeno de combustión prematura dentro del pistón.

1.3. Causas de la autoignición

La causa de la detonación prematura, o autoignición, está estrechamente relacionada con la calidad del combustible. De acuerdo con la NOM-016-CRE-2016, la calidad de la gasolina se define mediante el cumplimiento de las especificaciones

establecidas para gasolinas Magna y Premium, presentadas en la Tabla 1 (CRE 2018).

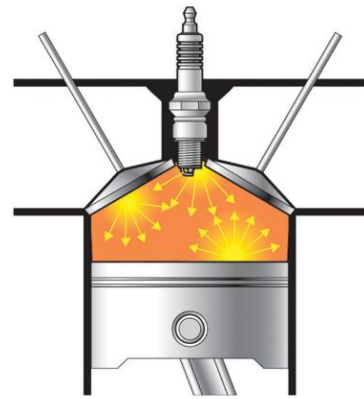


Figura 2. Combustión prematura de la gasolina en un motor de combustión interna (Kennepohl 2019).

Tabla 1. Estándares de calidad para gasolinas Magna y Premium (CRE 2018).

Parámetro	Unidad	Magna	Premium
No. Octano	Adimensional	87	91
Aromáticos	% volumen	32 máximo	32 máximo
Olefinas	% volumen	11.9 máximo	11.9 máximo
Benceno	% volumen	1.0 máximo	1.0 máximo
Azufre total	mg/kg	80 máximo	80 máximo

Las gasolinas ofrecen diferente poder antidetonante, y esta característica se indica mediante el denominado “número de octano” (o índice de octano). Su valor más elevado indica mayor poder antidetonante, y por el contrario, a menor octanaje, la resistencia a la autoignición será menor (Wang, Liu et al. 2017).

1.4. La Escala del Número de octano

El número de octano permite comparar la calidad de un hidrocarburo en particular o una mezcla de hidrocarburos con respecto al golpeteo de un motor. Por definición, la escala de números de octano para hidrocarburos asigna al n-heptano un número de 0.0 y al isooctano, un número de 100.0 como el de mejor calidad (Eriksson and Nielsen 2014). En México, el número de octano de la gasolina Magna es 87 y 92 para gasolina Premium, lo que explica la diferencia en calidad y costos entre ambas. En la Figura 3 se muestra una escala representativa del número de octano para algunos ejemplos de hidrocarburos.

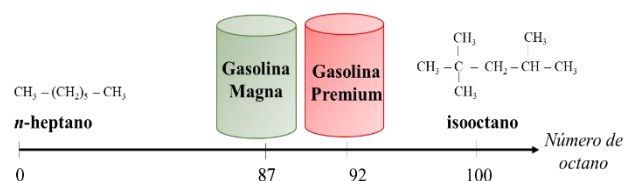


Figura 3. Escala representativa del número de octano para algunos hidrocarburos.

El número de octano es denominado RON, por sus siglas en inglés (Research Octane Number). Ver ejemplos en la Tabla 2. Otra medición del número de octano es la denominada MON, por sus siglas en inglés (Motor Octane Number). RON y MON

difieren en cuanto al procedimiento de evaluación utilizado. El RON representa el desempeño del motor a bajas velocidades, comúnmente experimentado en laboratorio, mientras que MON es representativo para conducción a alta velocidad (Antos and Aitani 2004) (Chen, Pal et al. 2020).

Tabla 2. Número de Octano de algunos hidrocarburos (Carey and Sundberg 2007).

Compuesto	RON	Compuesto	RON
<i>n</i> -heptano	0.0	<i>n</i> -octano	-19.0
2-metilhexano	42.4	2-metilheptano	21.7
3-metilhexano	52.0	2,3-dimetilhexano	71.5
3-etilpentano	65.0	3,3-dimetilhexano	75.5
2,2-dimetilpentano	92.8	2,2,3-dimetilpentano	109.6
2,3-dimetilpentano	91.1	2,2,4-trimetilpentano	100.0
3,3-dimetilpentano	83.1	2,3,3-trimetilpentano	106.1
benceno	106	2,3,4-trimetilpentano	102.7
tolueno	118	<i>o</i> -xileno	107
		<i>p</i> -xileno	117

1.5. ¿Cómo incrementar el número de octano en la gasolina?

El número de octano puede aumentarse agregando aditivos a los combustibles (ver sección 3). Sin embargo, la primera etapa de incremento de octanaje, ocurre durante el proceso reformación catalítica de las naftas, en donde los hidrocarburos de bajo número de octano, como naftenos y parafinas, se transforman en productos de número de octano más alto, como aromáticos y parafinas ramificadas (Iranshahi, Saeedi et al. 2017).

La nafta es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene de la destilación del petróleo, utilizada principalmente en la producción de gasolinas y compuestos aromáticos de alto valor para la industria química. El número de octano de la nafta es bajo, por lo que no es recomendable utilizarla directamente en los motores automotrices, sino que debe transformarse para aumentar su número de octano (Aboites, Domínguez et al. 2004). La composición típica de una nafta se presenta en la Figura 4. Adicionalmente, las naftas también presentan compuestos orgánicos de azufre y nitrógeno, agua, sales y óxidos metálicos (Carey and Sundberg 2007).



Grupo de hidrocarburos	Ejemplo	% en la mezcla
<i>n</i> -parafinas	$\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_5 - \text{CH}_3$ <i>n</i> -heptano	40 – 70
olefinas	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH}_2$ 1-buteno	0 – 2
Naftenos	 ciclohexano	20 – 50
Aromáticos	 benceno	5 – 20

Figura 4. Composición típica de las naftas

2. Proceso de reformación catalítica de las naftas

La *reformación catalítica de las naftas* (reformado) es un proceso químico utilizado para la transformación de la nafta de

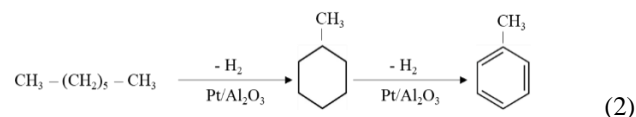
bajo índice de octano en nafta de alto número de octano (Koksharov, Ivanchina et al. 2015). Durante el proceso, las moléculas de hidrocarburos sufren un reordenamiento en sus estructuras para formar compuestos cíclicos y aromáticos que aumentan la calidad del reformado; es decir, su número de octano (Rodríguez and Ancheyta 2011).

El proceso de reformado ocurre en un rango de temperaturas entre 400 °C y 500 °C, con presiones que varían entre 25 y 50 atmósferas, logrando la deshidrogenación e isomerización de alcanos dando lugar a una mezcla rica en aromáticos como benceno, xileno y tolueno, BXT (Primo 1995).

Es importante señalar que previo al proceso de reformación catalítica de las naftas, se lleva a cabo la *hidrodesulfuración*, proceso fundamental para la remoción del azufre y otras impurezas en las naftas. El azufre causa envenenamiento en el catalizador del proceso de reformación catalítica, y, por lo tanto, reduce su tiempo de vida, además de ser un potencial contaminante presente en la lluvia ácida (Liu, Liu et al. 2018).

2.1. ¿Qué sucede durante el proceso de reformación catalítica?

Las reacciones que ocurren durante el proceso de reformación catalítica de las naftas han sido clasificadas en cuatro grupos principales: a) Deshidrogenación de naftenos a aromáticos; b) Deshidrociación de parafinas a aromáticos; c) Isomerización y d) Hidrocracking (Elizalde and Ancheyta 2015). Una reacción típica de isomerización se muestra en la Ecuación 2, donde el *n*-heptano es transformado a tolueno, compuesto que incrementa el número de octano en la mezcla.



Los hidrocarburos de cadenas ramificadas incrementan el número de octano en la mezcla debido a que forman radicales libres que se estabilizan con este tipo de estructuras, favoreciendo la reacción de combustión. Por ello, la ignición puede ser controlada y completada, evitando que se generen productos remanentes causantes de la autoignición no deseada (Alvarado, Delgado et al. 2015).

2.2. Catalizadores utilizados en el proceso de reformación

En el proceso de reformación catalítica de las naftas, es importante favorecer la formación de productos antes mencionados que requieren catalizadores de alto desempeño.

Los catalizadores bifuncionales son llamados así por su capacidad de poseer una función metálica y una función ácida, ambas necesarias para las reacciones químicas que ocurren en estos procesos. Los catalizadores de platino soportados sobre alúmina cumplen con esta doble función. En el metal ocurre la conversión de cicloalcanos a aromáticos, la hidrogenación de olefinas y la deshidrociación de parafinas. La función ácida es aportada por la alúmina para favorecer las reacciones de isomerización de alcanos y cicloalcanos (Olah and Monlar 2003).

Los primeros catalizadores utilizados en el proceso de reformación eran denominados monometálicos, por estar

formados de un solo metal y un soporte. En la actualidad, los catalizadores más recurrentes son los catalizadores bimetálicos, por contener dos metales y una parte ácida que también sirve de soporte (Jafari, Rafiei et al. 2013). El desplazamiento de los catalizadores monometálicos por los bimetálicos se debe a que mejoran la selectividad y disminuyen la deposición de coque sobre el catalizador, por lo que aumenta su rendimiento y genera una reducción posterior en costos (Antos and Aitani 2004). Se han realizado diversos estudios sobre pares de catalizadores utilizados en el proceso de reformación. Generalmente, el primer metal es el platino soportado en cloruro de alúmina. Para el segundo metal, se han desarrollado propuestas que incluyen estaño (Raffinage 1969), Renio (Kluksdahl 1968), Germanio (McCallister 1971), Iridio (Sinfelt 1976) e Indio (Antos 1976).

Recientemente, se han realizado estudios para reemplazar al cloruro de alúmina por zeolitas (Y), debido a la corrosión que el cloruro puede generar en los equipos del proceso. Específicamente, se probó CeY, obteniendo una selectividad razonable y una mayor aromatización en el reformado, en comparación con el catalizador comercial de cloruro de alúmina (Zhang, Yang et al. 2019).

2.3. Clasificación de los procesos de reformación catalítica

Los procesos de Reformación Catalítica de las Naftas se clasifican en continuos, cíclicos y semi-regeneradores, dependiendo de la frecuencia de regeneración del catalizador.

En el proceso de reformación semiregenerativa, se realizan paros de operación de forma periódica para regenerar el catalizador (una vez al año, en promedio). Para prolongar el tiempo entre paros de operación, se utilizan altas presiones en los reactores (25 – 35 atm) lo que minimiza la actividad del catalizador por deposición de coque. Se han empleado catalizadores de renio y platino para trabajar a presiones más bajas (13- 20 atm) obteniendo números de octano entre 95 y 98 (Antos and Aitani 2004).

En los procesos de reformación catalítica regenerativa (CCR) se remueven de forma continua pequeñas cantidades de catalizador del último reactor para ser regeneradas y posteriormente se reincorporan al primer reactor. El producto obtenido en el último reactor es enviado a un separador donde se divide la carga en líquido y vapor (Saeedi and Iranshahi 2017). El proceso CCR *Platforming* (Yusuf, John et al. 2019) ha sido utilizado a ultra bajas presiones (3 atm) obteniendo productos con número de octano superiores a 108. Más del 95% de los nuevos catalizadores para reformación catalítica de naftas se diseñan para procesos de regeneración continua (Treese, Pujadó et al. 2015).

El proceso de reformación cíclica utiliza reactores de lecho fijo. Cada reactor del conjunto de reactores puede ser retirado del proceso para regenerar el catalizador y posteriormente se reincorpora al proceso, evitando pérdidas en la producción. En los procesos de regeneración cíclica, la presión de los reactores es de aproximadamente 14 atm, entregando reformados con un número de octano cercano a 100 (Treese, Pujadó et al. 2015).

3. ¿Es el fin de los hidrocarburos?

El uso de las energías alternativas se encuentra en franca expansión en diversos sectores de la población, pero la perspectiva sobre el uso del petróleo hasta 2035 indica que los

combustibles fósiles continuarán representando la principal fuente energética a nivel mundial (BP 2019).

El gas natural desempeña un papel importante en el proceso de transición del petróleo a fuentes energéticas menos contaminantes, principalmente en la generación de electricidad. No obstante, el petróleo aún no puede ser reemplazado en su totalidad puesto que las nuevas fuentes de energía no lograrían abastecer toda la demanda del sector energético.

Actualmente, la gasolina, es el combustible más utilizado en todo el mundo (Sarathy, Farooq et al. 2018). En México, el 79% del petróleo refinado es destinado para abastecer las necesidades energéticas del sector transporte (SEMARNAT, 2017), convirtiéndose en el mayor generador de gases de efecto invernadero (GEI). Una medida de mitigación de las emisiones de GEI provenientes de los vehículos automotrices consiste en mejorar la calidad de las gasolinas, mediante el cumplimiento de la normatividad establecida sobre límites máximos permisibles de compuestos contaminantes y los números de octano mínimos para cada tipo de gasolina (CRE 2018)

Uno de los contaminantes con mayor restricción en las gasolinas es el plomo. A principios del siglo XX, el tetraetilo de plomo se utilizó como antidetonante en las mezclas de gasolina para los motores de combustión interna. Sin embargo, en la década de 1990 México prohibió en su totalidad la utilización de tetraetilo de plomo en las gasolinas, debido a que las emisiones tóxicas de los vehículos liberadas a la atmósfera, que constituían la principal fuente de exposición humana a este compuesto, considerado altamente carcinogénico y tóxico (Mallma, Lamadrid-Figueroa et al. 2007). Para sustituir el uso del tetraetilo de plomo, se introdujo en el mercado el metil terbutil éter (MTBE), que, aunque no es carcinogénico, genera un impacto medioambiental. Por esta razón, han sido investigados nuevos aditivos, como es el caso del etanol que resulta ser 15% menos perjudicial al medio ambiente, según los resultados obtenidos en un análisis de ciclo de vida del MTBE y etanol (Yang, Shao et al. 2020).

Además del uso de aditivos, es importante mejorar la calidad de las gasolinas, lo cual implica desarrollar un esquema de optimización del proceso de reformación catalítica de las naftas, que permite aumentar el número de octano de los combustibles y mejorar el rendimiento de los motores (Wauquier 2004).

La optimización del proceso de reformación catalítica de las naftas se inicia desde la identificación de la composición de la nafta de alimentación y el estudio de los parámetros de operación, que permita obtener un reformado de mayor calidad. Se han reportado diversos estudios sobre optimización de la reformación catalítica, como son los trabajos de Hussein y col., quienes determinaron que a mayor temperatura de alimentación de la nafta, aumenta el rendimiento de aromáticos, lo que significa un número de octano mayor (Elsayed, Menoufy et al. 2017).

El desarrollo de investigaciones y la generación de nuevos conocimientos en los procesos de reformación catalítica de las naftas permitirán mejorar gradualmente la calidad de los combustibles, su eficiencia y, como consecuencia, reducir las emisiones de GEI a la atmósfera. De ahí la importancia de la planta piloto de reformación catalítica de naftas, en donde es posible validar los resultados obtenidos con simuladores y ajustar o crear nuevos programas operativos para optimizar los procesos a nivel industrial.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las condiciones de infraestructura para desarrollar el programa de Doctorado en Ciencias Ambientales que permitió la elaboración de este trabajo.

4. Referencias

- Aboites, J., J. M. Domínguez and T. Beltrán (2004). La triada innovadora: investigación y desarrollo en catálisis. México, Siglo XXI.
- Alvarado, J. G., J. G. Delgado and H. R. Medina (2015). "Rol de la Química Orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos." *Educación Química* 26(4): 288-298.
DOI: 10.1016/j.eq.2015.08.001
- Antos, G. and A. Aitani (2004). *Catalytic Naphta Reforming*. Illinois, Marcel Dekker.
- Antos, G. J. (1976). Dehydrocyclization with an acidic multimetallic catalytic composite. Estados Unidos, Honeywell UOP LLC. Patente No. 4032587.
- BP (2019). *BP Energy Outlook 2019*. Reino Unido, British Petroleum: 73.
- Carey, F. and R. Sundberg (2007). *Advanced Organic Chemistry*. New York, Springer.
- Castañeda, D., S. Jorge and P. Sedano (2019). *Derivados del Petróleo*. México, CONUEE.
- CRE (2018). Especificaciones de calidad de los petrolíferos. NOM-016-CRE-2016. Comisión Reguladora de Energía. México, Diario Oficial de la Federación.
- Crouse, W. (1993). *Mecánica del Automóvil*. España, Marcombo.
- Chen, C., P. Pal, M. Ameen, D. Feng and H. Wei (2020). Large-eddy simulation study on cycle-to-cycle variation of knocking combustion in a spark-ignition engine. *Applied Energy* 261: 114447.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114447>.
- Chuzlov, V., G. Nazarova, E. Ivanchina, E. Ivashkina, I. Dolganova and A. Solopova (2019). Increasing the economic efficiency of gasoline production: Reducing the quality giveaway and simulation of catalytic cracking and compounding. *Fuel Processing Technology* 196: 106139.
DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106139
- Elizalde, I. and J. Ancheyta (2015). Dynamic modeling and simulation of a naphtha catalytic reforming reactor. *Applied Mathematical Modelling* 39(2): 764-775.
DOI: 10.1016/j.apm.2014.07.013
- Elsayed, H. A., M. F. Menoufy, S. A. Shaban, H. S. Ahmed and B. H. Heakal (2017). Optimization of the reaction parameters of heavy naphtha reforming process using Pt-Re/Al₂O₃ catalyst system. *Egyptian Journal of Petroleum* 26(4): 885-893.
DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.03.009
- Eriksson, L. and L. Nielsen (2014). *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. Chennai, Wiley.
DOI: 10.1002/9781118536186.
- Hougen, A., K. Watson and R. Ragatz (2005). *Principios de los Procesos Químicos*. Barcelona, Barcelona, Reverté.
- Iranshahi, D., R. Saeedi, K. Azizi and M. Nategh (2017). A novel integrated thermally coupled moving bed reactors for naphtha reforming process with hydrodealkylation of toluene. *Applied Thermal Engineering* 112: 1040-1056.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.118>.
- Jafari, M., R. Rafiei, S. Amiri, M. Karimi, D. Iranshahi, M. R. Rahimpour and H. Mahdiyar (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: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.039>
- Kennepohl, D. (2019) *Gasoline: A deep look*.
- Kluksdahl, H. (1968). Reforming a sulfur-free naphtha with a platinum-rhenium catalyst. Estados Unidos, Chevron Research and Technology Co.
- Koksharov, A. G., E. D. Ivanchina, S. A. Faleev and A. I. Fedyushkin (2015). The Way of Increasing Resource Efficiency of Naphtha Reforming Under Conditions of Catalyst Acid and Metal Activity Balance by Mathematical Modeling Method. *Procedia Engineering* 113: 1-7.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.276>.
- Liu, B., L. Liu, Y.-m. Chai, J.-c. Zhao and C.-g. Liu (2018). Essential role of promoter Co on the MoS₂ catalyst in selective hydrodesulfurization of FCC gasoline. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* 46(4): 441-450.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(18\)30019-7](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(18)30019-7).
- Mallma, P., H. Lamadrid-Figueroa, G. Angeles, H. Riojas and M. M. Tellez Rojo Solis (2007). Impact of the elimination of lead in gasoline on the blood lead concentration of children of Mexico City.
DOI: 10.13140/RG.2.1.4411.8801.
- McCallister, K. R. (1971). Francia. Patente No. 2078056.
- Muñoz, M. and A. Rovira (2014). Máquinas Térmicas. Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Olah, G. and Á. Monlar (2003). *Hydrocarbon Chemistry*. New Jersey, Wiley.
- Primo, E. (1995). *Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*. vol 2, Reverté.
- Raffinage, F. (1969). Francia. Patente No. 2031984.
- Rodríguez, M. A. and J. Ancheyta (2011). Detailed description of kinetic and reactor modeling for naphtha catalytic reforming. *Fuel* 90(12): 3492-3508.
DOI: 10.1016/j.fuel.2011.05.022.
- Saeedi, R. and D. Iranshahi (2017). Multi-objective optimization of thermally coupled reactor of CCR naphtha reforming in presence of SO₂ oxidation to boost the gasoline octane number and hydrogen. *Fuel* 206: 580-592.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.024>
- Sarathy, S. M., A. Farooq and G. T. Kalghatgi (2018). Recent progress in gasoline surrogate fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 65: 67-108.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.09.004>
- Sinfelt, J. H. (1976). Estados Unidos. Patente No. 3953368.
- Treese, S., P. R. Pujadó and D. Jones (2015). *Handbook of Petroleum Processing*. Illinois, Springer.
- Wang, Z., H. Liu and R. D. Reitz (2017). Knocking combustion in spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 61: 78-112.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.03.004>.
- Wauquier, J. P. (2004). *El refino del petróleo. Petróleo crudo. Productos petrolíferos. Esquemas de fabricación*. España, Díaz de Santos, S.A.
- Yang, Q., S. Shao, Y. Zhang, H. Hou, C. Qin, D. Sun and Y. Liu (2020). Comparative study on life cycle assessment of gasoline with methyl tertiary-butyl ether and ethanol as additives. *Science of The Total Environment*: 130-138.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138130>.
- Yusuf, A. Z., Y. M. John, B. O. Aderemi, R. Patel and I. M. Mujtaba (2019). Modelling, simulation and sensitivity analysis of naphtha catalytic reforming reactions. *Computers & Chemical Engineering* 130: 106531.
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106531.
- Zhang, P., Y. Yang, Z. Li, B. Liu and C. Hu (2019). Preparation, characterization and naphtha aromatization performance of the catalytic reforming catalyst Pt/MY (M = Mg, Ba or Ce). *Catalysis Today*.
DOI: 10.1016/j.cattod.2019.07.032.