

9. Aditivos para gasolinas

DOI: [cc.443.09](https://doi.org/10.443/09)

RICARDO CERÓN CAMACHO*

Resumen

La gasolina es uno de los productos derivados del petróleo que tienen más impacto en nuestra vida cotidiana y es mucho más que un simple hidrocarburo. Detrás de su composición, se esconde una mezcla compleja de hidrocarburos cuya química es realmente fascinante; ya que, existen muchos tipos de compuestos químicos llamados aditivos. En México, la composición y calidad de este combustible están reguladas por la NOM-016-CRE-2016, la normativa que dicta los estándares de calidad para proteger tanto a los motores como al medio ambiente. Además, esta norma recomienda el uso de ciertos compuestos llamados aditivos, los cuales son compuestos químicos diseñados para mejorar la calidad del combustible, optimizar el rendimiento del motor y prolongar la vida útil de los componentes internos del vehículo.

Palabras clave: *combustible, gasolina, producto químico, aditivo, isooctano.*

Introducción

La gasolina es uno de los combustibles más importantes para la sociedad actual. Desde el transporte personal, taxis, motos, autos, autos híbridos, hasta la agricultura y la industria. Su demanda es extremadamente grande, ya que impulsa una parte significativa de la economía global. Sin embargo, detrás de su aparente simplicidad como líquido inflamable, se esconde una

* Doctor en Ciencias, profesor-Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo, México.
ORCID: 0000-0003-2757-4963; Scopus: 12760894900; correo electrónico: rceron@imp.mx

química sorprendentemente compleja y fascinante. De forma general, se puede definir a la gasolina como una mezcla de hidrocarburos que, a través de su combustión controlada, libera la energía necesaria para poner en marcha un motor de combustión interna, el cual mueve nuestros vehículos y máquinas (Martínez Palou y Cerón Camacho, 2023; Velasco y García, 2025).

Desde el punto de vista químico, la gasolina es una mezcla compleja de diferentes tipos de hidrocarburos, básicamente compuestos orgánicos que contienen exclusivamente átomos de carbono e hidrógeno. La gasolina proviene principalmente de la destilación primaria (atmosférica), con puntos de destilación en el rango de -1 a 216 °C y cuyo tamaño de cadena hidrocarbonada característicamente corresponde a C_5-C_{12} . Además, otras corrientes de la refinería aportan fracciones valiosas al llamado mix, blender o pool de la gasolina (mezcla). entre los cuales destacan el proceso de reformado, isomerización, FCC y la alquilación (Velázquez, 2024). Los hidrocarburos que componen la gasolina varían en tamaño y estructura, abarcando desde moléculas pequeñas con pocos átomos de carbono hasta otras más grandes y complejas. En la tabla 9.1 se pueden apreciar y comparar los tamaños de cadena y los poderes caloríficos de algunos combustibles derivados del petróleo.

Tabla 9.1. Rangos de destilación y poder calorífico de algunos combustibles derivados del petróleo

	Tamaño de cadena	Rango de punto de ebullición (°C)	Poder calorífico (MJ/bl)
Gas natural*	C_1-C_4	-161 a -1	40 333 kJ/m ³
Gas licuado	C_3-C_4	-42 a -1	4 153
Nafta	C_5-C_{17}	36 a 302	5 269
Gasolina	C_5-C_{12}	-1 a 216	4 781
Diésel	C_8-C_{18}	126 a 258	5 990

Fuente: elaboración propia.

* El cambio de unidades obedece a que el gas natural es gaseoso en relación con los otros combustibles.

La mayoría de los hidrocarburos presentes en la gasolina se clasifican en varias familias principales, a las cuales se les conoce como PIONA: parafinas, isoparafinas (alcanos lineales y ramificados), olefinas (alquenos), naftenos (cicloalcanos), y aromáticos.

Las *parafinas* o alcanos son hidrocarburos saturados, lo que significa que sólo contienen enlaces simples C–C y C–H. Su estructura química es lineal y contribuyen significativamente a su poder calorífico. Ejemplos comunes incluyen el hexano (C_6H_{14}), el heptano (C_7H_{16}) y el octano (C_8H_{18}). Las *isoparafinas* corresponden a los isómeros ramificados de los alcanos. Por ejemplo, el octano tiene su versión ramificada que es el isooctano (2,2,4-trimetilpentano), el cual es crucial para determinar el índice de octano de la gasolina, una medida de su resistencia a la detonación.

Los cicloalcanos son hidrocarburos saturados con estructura cíclica, como el ciclopentano (C_5H_{10}) y el ciclohexano (C_6H_{12}). Aunque se encuentran presentes en menor proporción que los alcanos de cadena abierta, también contribuyen a las propiedades de combustión de la gasolina. Las *olefinas* o alquenos son hidrocarburos insaturados que contienen al menos un enlace doble C=C. Aunque su presencia en la gasolina es generalmente menor debido a su mayor reactividad y tendencia a formar gomas (polímeros) que pueden obstruir los sistemas de combustible, algunos alquenos ligeros pueden estar presentes. Los *naftenos* son compuestos cíclicos saturados que se encuentran naturalmente en el petróleo crudo y son componentes importantes de la gasolina refinada. Tienen una fórmula general de C_nH_{2n} y son conocidos por su capacidad para mejorar el índice de octano de la gasolina. Finalmente, los compuestos *aromáticos* son hidrocarburos cíclicos que contienen uno o más anillos de benceno.

Ejemplos incluyen el benceno (C_6H_6), el tolueno (C_7H_8) y los xilenos (C_8H_{10}), es decir, la mezcla BTX (benceno, tolueno y xilenos). Los aromáticos tienen un alto índice de octano inherente y contribuyen a la densidad energética de la gasolina; sin embargo, su presencia está regulada debido a preocupaciones de salud y ambientales, ya que algunos, como el benceno, son carcinógenos conocidos (la tabla 9.2 se ubica en la siguiente página).

La proporción relativa y la estructura de estos diferentes tipos de hidrocarburos determinan las propiedades clave de la gasolina, incluyendo su volatilidad, densidad, poder calorífico y, crucialmente, su índice de octano. La volatilidad se refiere a la facilidad con la que la gasolina se vaporiza, lo cual es esencial para una mezcla adecuada de aire y combustible en el motor, especialmente en arranques en frío. La densidad afecta la cantidad de energía por unidad de volumen. El poder calorífico es la cantidad de

energía liberada por unidad de masa o volumen cuando la gasolina se quema. La gasolina, por ejemplo, contiene cantidades moderadas de naftenos, hasta un 30% de olefinas y hasta un 40% de aromáticos. Estos parámetros fisicoquímicos varían entre la proporción del PIONA y afectan el índice de octano (Bennett, 2014).

Tabla 9.2. *Análisis PIONA de las gasolinas mexicanas. Actualmente, la NOVA está descontinuada*

Gasolina	Octanaje	Composición de gasolinas mexicanas (%)				
		Parafinas	Isoparafinas	Olefinas	Naftenos	Aromáticos
Nova	87	9.59	38.34	7.36	6.10	38.61
Magna	89	9.06	38.13	5.60	3.84	43.36
Premium	92	7.48	39.68	6.22	3.26	43.36

Fuente: elaboración propia.

Índice de octano

El índice de octano es una de las propiedades más importantes y comercialmente relevantes de la gasolina. Es una medida de la resistencia del combustible a la detonación en un motor de combustión interna (Stauffer *et al.*, 2008). La detonación ocurre cuando la mezcla de aire y combustible se “autoenciende” o “combustiona por sí misma” de forma prematura debido a la compresión del motor, lo que puede causar daños graves al motor. Un índice de octano más alto indica una mayor resistencia a la detonación. Este índice se determina comparando el comportamiento de la gasolina con una mezcla de isooctano (con un índice de octano asignado de 100 y resiste bien la detonación) y n-heptano (con un índice de octano de 0 y es propenso a la detonación).

Como se puede apreciar, la composición química de la gasolina es demasiado compleja, por lo que, de forma promedio, se puede asumir su composición y se pueden predecir ciertas propiedades fisicoquímicas a través del PIONA y el índice de octano. Sin embargo, existen regulaciones (leyes) para la distribución, venta y uso de los combustibles. Esto ocurre tanto a nivel nacional como internacional. Por ejemplo, en Estados Unidos existe la

legislación *Fuel Effects on Vehicle Emissions* de la EPA (*Fuel Effects on Vehicle Emissions* | US EPA, s. f.) y en México están las *Especificaciones de la Calidad de los Petrolíferos*, (NOM-016-CRE-2016. Especificaciones de calidad de los petrolíferos, s. f.). Ésta norma es aplicable en todo el territorio nacional a las gasolinas, la turbosina, el diésel automotriz, el diésel agrícola y marino, el diésel industrial, el combustóleo, el gasóleo doméstico, el gasavión, la gasolina de llenado inicial, el combustóleo intermedio y el gas licuado de petróleo en toda la cadena de producción y suministro, incluida su importación. Es decir, es la regulación a la cual están sometidos los combustibles en México.

Regulaciones

La calidad de la gasolina en México es un tema de vital importancia para la salud pública, el desempeño automotriz y la protección del medio ambiente. Para garantizar que el combustible que llega a los consumidores cumpla con ciertos estándares, el gobierno mexicano ha implementado una serie de normativas, principalmente a través de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y otras dependencias. Dentro de estas regulaciones, la parte composicional (o desde el punto de vista de la química) y la normativa de aditivos para gasolinas juega un papel crucial, dictando qué sustancias pueden ser añadidas al combustible, en qué proporciones y bajo qué criterios, con el objetivo de mejorar sus propiedades y mitigar sus impactos negativos.

El pilar fundamental de la regulación de la calidad de los petrolíferos en México, incluyendo la gasolina y sus aditivos, es la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos. Esta norma, y sus posteriores modificaciones, establece los parámetros de calidad que deben cumplir los combustibles en cada etapa de la cadena de producción y suministro, desde la importación hasta el expendio al público. La NOM-016-CRE-2016 es el marco de referencia que define las propiedades físicas y químicas de la gasolina, incluyendo los límites para componentes como el azufre, benceno, aromáticos, olefinas, y el contenido de oxigenantes, todos los cuales pueden ser afectados o controlados por la adición de aditivos.

En el contexto de los aditivos, la normativa mexicana se enfoca principalmente en garantizar dos aspectos esenciales: la funcionalidad y la seguridad. La

funcionalidad se refiere a que los aditivos cumplan con su propósito declarado, ya sea mejorar el octanaje, limpiar el motor o proteger contra la corrosión, sin comprometer otras propiedades del combustible. La seguridad, por su parte, abarca tanto la protección de la salud humana como la minimización del impacto ambiental, regulando la presencia de sustancias potencialmente nocivas.

Particularmente para las gasolinas y otros combustibles, se hace necesario un control de calidad estricto que garantice que la composición sea homogénea en cuanto a sus propiedades y desempeño en los motores.

Aditivos para gasolinas

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, un aditivo se define como aquella sustancia química añadida a los petrolíferos con el objeto de proporcionarles propiedades específicas. Cabe mencionar que se excluyen de esta categoría los agentes oxigenantes que se agregan a las gasolinas y los odorizantes del gas licuado de petróleo (Velasco y García, 2025). Entonces, específicamente, los aditivos para gasolina son compuestos químicos que se incorporan al combustible para mejorar su rendimiento, eficiencia y impacto ambiental.

Estas sustancias cumplen diversas funciones, como mejorar la limpieza del motor, reducir las emisiones y aumentar el octanaje. Entre los aditivos comunes se encuentran los detergentes, que previenen la acumulación de depósitos en los inyectores de combustible y las válvulas de admisión, manteniendo así un funcionamiento óptimo del motor. Se incorporan antioxidantes para inhibir la degradación del combustible durante el almacenamiento, mientras que los inhibidores de corrosión protegen los componentes metálicos del sistema de combustible. Otra categoría de aditivos son los potenciadores de octano, los cuales aumentan la resistencia del combustible a la detonación, lo que permite relaciones de compresión más altas y una mejor eficiencia del motor. Todos estos aditivos suelen contener compuestos químicos de diversas naturaleza, desde compuestos orgánicos hasta organometálicos, aunque las regulaciones ambientales han impulsado el desarrollo de alternativas sin metales (Bennett, 2014).

Uno de los aditivos más regulados y con mayor impacto en la calidad de la gasolina es el oxigenante. En México, el uso de oxigenantes como el etanol anhidro se ha promovido para aumentar el octanaje de la gasolina y, en algunos casos, reducir las emisiones contaminantes. La NOM-016-CRE-2016 establece límites específicos para el contenido de etanol en las gasolinas, generalmente permitiendo hasta un 10% en volumen en la mayoría del territorio nacional, con excepciones para zonas metropolitanas críticas como la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, donde históricamente se ha prohibido su uso debido a preocupaciones sobre la formación de ozono troposférico. Esta regulación busca equilibrar los beneficios del etanol (alto octanaje, renovabilidad) con sus posibles desventajas (corrosión, mayor volatilidad, impacto en emisiones). Sin embargo, el uso de oxigenantes ha sido objeto de debate debido a posibles problemas ambientales y de compatibilidad con ciertos tipos de motores, tal es el caso del metil-terbutil éter (Kümmerer, 2011).

Otro aditivo fundamental, y explícitamente mencionado en la NOM-016-CRE-2016, es el aditivo detergente/dispersante. Estos aditivos son obligatorios en las gasolinas comercializadas en México. Su función principal es prevenir la formación de depósitos de carbón en los inyectores de combustible y las válvulas de admisión del motor, lo que ayuda a mantener la eficiencia del motor, reducir las emisiones y optimizar el consumo de combustible. La normativa mexicana exige que estos aditivos sean probados y certificados de acuerdo con métodos específicos de la ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), como el ASTM D5598 (*ASTM D.5598 Standard Test Method for Evaluating Unleaded Automotive Spark-Ignition Engine Fuel for Electronic Port Fuel Injector Fouling*, s. f.) y el ASTM D5500, (*ASTM D5500. Standard Test Method for Vehicle Evaluation of Unleaded Automotive Spark-Ignition Engine Fuel for Intake Valve Deposit Formation*, s. f.) en laboratorios acreditados. Esto asegura que los detergentes/dispersantes utilizados sean efectivos y cumplan con los estándares de rendimiento. La obligación de los permisionarios que añaden estos aditivos de presentar reportes semestrales sobre su uso es un mecanismo de supervisión importante.

Además de los oxigenantes y los detergentes/dispersantes, la normativa mexicana considera otros tipos de aditivos, aunque no siempre se enumeran de manera exhaustiva ni en la misma medida. La NOM-016-CRE-2016

establece que cualquier aditivo no especificado en la norma debe ser autorizado por la Comisión Reguladora de Energía previo a su uso en petrolíferos. Éste procedimiento de autorización implica la presentación de estudios y pruebas que demuestren la seguridad y funcionalidad del aditivo, asegurando que no comprometa la calidad del combustible o genere riesgos para la salud o el ambiente. Los aditivos más comunes que se emplean en gasolinas se muestran en la figura 9.1.

Figura 9.1.



Fuente: elaboración propia.

La regulación mexicana también ha evolucionado significativamente en relación con aditivos que históricamente fueron problemáticos, como el tetraetil-plomo, el cual fue empleado por años en las gasolinas NOVA. Después, siguiendo la tendencia global, México prohibió el uso de plomo en las gasolinas para proteger la salud pública y el medio ambiente, ya que el plomo es un neurotóxico conocido y daña los convertidores catalíticos de los vehículos. Esta prohibición es un ejemplo clave de cómo la normativa de aditivos se alinea con los objetivos de salud y sostenibilidad.

La eficacia y la necesidad de los aditivos para gasolina siguen siendo temas de investigación y debate en las comunidades científicas. A medida que las tecnologías de los motores evolucionan y las normas de emisiones se vuelven más estrictas, la formulación de aditivos para gasolina sigue siendo un área de desarrollo activo en la búsqueda de combustibles más limpios y eficientes para el transporte.

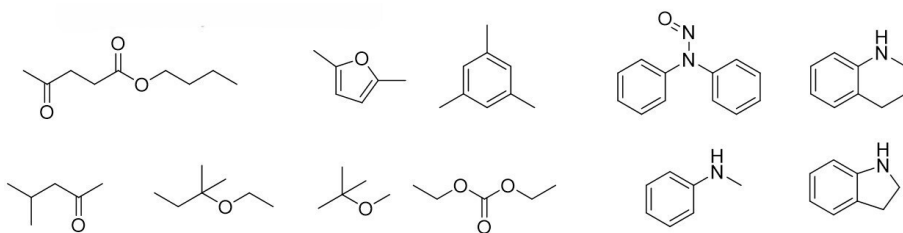
Los aditivos son componentes minoritarios, pero críticos, que mejoran las propiedades de la gasolina o mitigan sus efectos adversos (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013). Algunos aditivos comunes incluyen:

Antidetonaantes o mejoradores de octano:

Originalmente era el tetraetilplomo, pero ahora hay compuestos orgánicos sin plomo, como el MTBE (metil-terbutil éter), etanol y otros oxigenados, que aumentan el índice de octano y promueven una combustión más completa. Sin embargo, el MTBE ha sido prohibido en muchos lugares debido a la contaminación del agua subterránea. El etanol es cada vez más común, pero puede tener implicaciones en la corrosión y en la compatibilidad con ciertos materiales del motor (Velázquez, 2024).

Los antidetonantes o mejoradores de octano se dividen en dos categorías: componentes de gasolina de alto octanaje y aditivos potenciadores de octanaje, con una concentración de 2 % en volumen. Las familias químicas que más prometen como agentes de alto octanaje son éteres, cetonas y ésteres o, como aditivos potenciadores del octanaje, algunas anilinas, N-nitrosaminas y fenoles (figura 9.2) (*New Octane Booster Molecules for Modern Gasoline Composition | Energy and Fuels*, s. f.).

Figura 9.2. Ejemplos de mejoradores de octano empleados en gasolina



Fuente: elaboración propia.

Detergentes (dispersantes):

Como el nombre lo indica, su estructura química se basa en moléculas anfifílicas, es decir, con una parte polar (hidrofílica) y otra no polar (hidrofóbica), lo que les permite interactuar tanto con el combustible (hidrocarburos) como con los depósitos polares (también llamados gomas o incrustaciones orgánicas). Estos surfactantes, gracias a su actividad de superficie, mantienen dispersos (de ahí el nombre dispersante) los precipitados o las gomas que taponean las válvulas de inyección, lo que, a la larga, provoca problemas de combustión. Dichas moléculas con propiedades de superficie también previenen la formación de depósitos y “lavan” o “limpian” los inyectores y las válvulas de admisión; esto gracias a su actividad de detergencia en el sistema de combustible, manteniendo el motor limpio y eficiente. Estos aditivos son cruciales para mantener limpios dichos componentes del motor, lo cual ayuda a alargar la vida útil del motor y contribuye a mejorar su potencia, mejorando notablemente el proceso de combustión, lo cual previene la formación de gases indeseables, productos de combustiones ineficientes (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

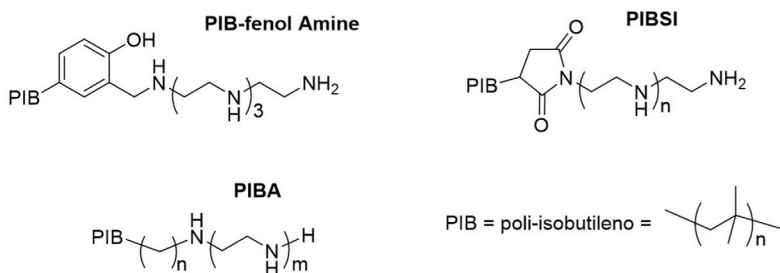
En particular, los detergentes suelen ser aminas de alto peso molecular, a menudo derivadas de polímeros. Las poliisobutilén aminas (PIBA) y las poliisobutilén succinimidas (PIBSI).

La PIBA posee una larga cadena de poliisobutileno (hidrofóbica) y un grupo amina (hidrofílico), lo cual le confiere un alto grado de estabilidad térmica en las condiciones de operación del motor de combustión interna. Por otra parte, la PIBSI es más sofisticada en su estructura molecular, ya que incluye una porción de succinimida que mejora la dispersión y la termoestabilidad, unida a una cadena de poliisobutileno, lo que le confiere una actividad detergente y dispersante más eficiente en el combustible.

Además, los dispersantes mantienen los depósitos en suspensión, evitando que se aglomeren y se adhieran a las superficies. A menudo son componentes similares a los detergentes o coaditivos que mejoran su acción. Su funcionamiento se basa en su capacidad para encapsular, en redes micelares, las partículas de suciedad y depósitos (formados por la degradación del combustible o la combustión incompleta) y mantenerlas en suspensión en la gasolina. Cuando el combustible se quema, estos depósitos se queman junto con él o se dispersan en la corriente de escape, evitando su acumulación en

inyectores y válvulas. Esto asegura una pulverización fina del combustible y un flujo de aire adecuado, lo que mantiene la potencia y la eficiencia del motor (figura 9.3) (Oviedo-Roa *et al.*, 2022).

Figura 9.3. Estructuras químicas generales de algunos detergentes-dispersantes usados en gasolinas

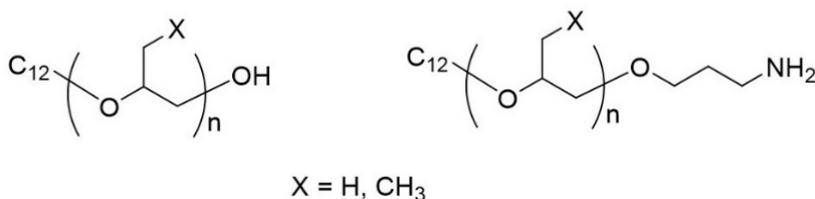


Fuente: elaboración propia.

Fluidizantes (acarreadores):

Son sustancias químicas diseñadas para mejorar la fluidez y la estabilidad de la gasolina. Esto puede sonar absurdo, ya que la gasolina ya es un líquido; sin embargo, la “fluidez” en este contexto se refiere a la capacidad de la gasolina para mantener sus componentes disueltos o dispersos, de tal manera que los acarrea y evita la formación de precipitados o geles, especialmente bajo ciertas condiciones de temperatura (sobre todo en climas fríos). Los fluidizantes actúan como “mediadores o acarreadores” moleculares. Su estructura química les permite interactuar tanto con los componentes hidrofóbicos (afines al hidrocarburo) de la gasolina como con los componentes hidrofílicos (afines al agua), como el etanol y la propia agua. De esta manera, ayudan a mantener todos los componentes en una solución homogénea, previniendo la separación de fases. Es como si añadieran un “estabilizador” invisible que mantiene unida la mezcla, incluso en presencia de pequeñas cantidades de agua. Entre los productos químicos empleados para este fin, se encuentran derivados de poli-éteres como polietilenglicoles o polipropilenglicoles (figura 9.4 se ubica en la siguiente página) (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

Figura 9.4. Ejemplos de aditivos fluidizantes. Izquierda: alquil-polietilen/polipropilenglicol éter, derecha: alquil-polietilen/polipropilenglicol éter-amina



Fuente: elaboración propia.

Inhibidores de corrosión:

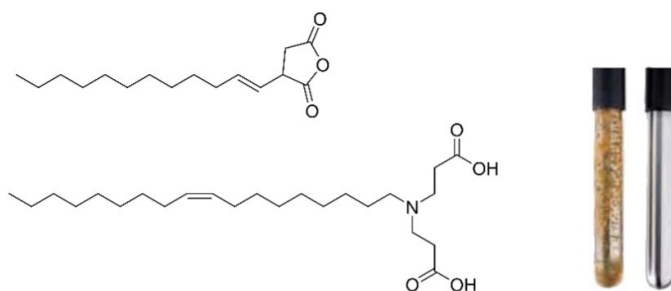
Protegen las tuberías y los componentes del motor de la corrosión. La presencia de humedad, ácidos y azufre en la gasolina puede provocar la corrosión de las partes metálicas del sistema de combustible y del motor. Desde el punto de vista químico, los inhibidores de corrosión forman una capa protectora sobre las superficies metálicas; esto ocurre a través de la formación de un enlace de coordinación entre un heteroátomo del inhibidor de corrosión (N u O) y un átomo de Fe de la superficie metálica (Cerón-Camacho *et al.*, 2019).

Químicamente, son compuestos polares que se adsorben en las superficies metálicas. Ejemplos incluyen ácidos grasos, aminas y sus sales. Las aminas, con su par de electrones no enlazados en el átomo de nitrógeno, pueden interactuar electrostáticamente con las superficies metálicas. Los ácidos grasos forman una película hidrofóbica que repele el agua.

Su mecanismo de acción implica la formación de una fina película protectora en las superficies metálicas que aísla el metal de los agentes corrosivos, como el agua y los compuestos ácidos.

El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) ha sido pionero en el desarrollo de inhibidores de corrosión para su uso en transporte y almacenamiento de hidrocarburos (IMP-ALICIM® así como en su uso en combustibles derivados del petróleo (figura 9.5) (Cerón-Camacho *et al.*, 2019).

Figura 9.5. Ejemplos de inhibidores de corrosión. Arriba: docecenil anhídrido succínico. Abajo: oleil-aminoácido-dipropionico patentado por el IMP. Derecha: prueba de eficiencia de corrosión, en ausencia de aditivo (cupón oxidado) y en presencia del inhibidor de corrosión (sin oxidar)



Fuente: elaboración propia.

Antioxidantes:

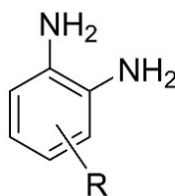
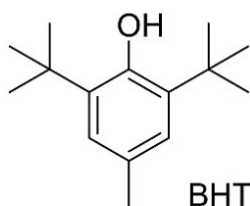
Los antioxidantes retrasan la oxidación del combustible, en otras palabras, entre los componentes que se pueden oxidar están los alquenos u olefinas. Estos componentes, al oxidarse, producen sustancias que pueden conducir a la formación de gomas y sedimentos (precipitados o incrustaciones orgánicas). La presencia de enlaces dobles $C=C$ los hace muy reactivos y susceptibles a la oxidación; en presencia de oxígeno (del aire), y con el tiempo o la temperatura, estos enlaces $C=C$ pueden romperse y dar lugar a la formación de radicales libres. Estos radicales libres, a su vez, reaccionan entre sí y con otras moléculas, polimerizándose y formando cadenas más largas y complejas que se manifiestan como los residuos gomosos o gelatinosos. Por ello, se dice que la gasolina puede oxidarse con el tiempo, especialmente en presencia de aire y a altas temperaturas, lo que lleva a la formación de dichas gomas y sedimentos que pueden obstruir los filtros y los inyectores. Los antioxidantes retardan este proceso (Bennett, 2014).

También se les conoce como “eliminadores o atrapadores de radicales libres”, ya que son el mecanismo de oxidación que produce las gomas. Químicamente, son compuestos que son más fácilmente oxidados que los hidrocarburos de la gasolina, o que reaccionan con los radicales libres que inician la oxidación. Los más comunes son las aminas aromáticas (como las

fenilendiaminas) y los fenoles impedidos estéricamente, como el 2,6-di-tert-butil-4-metilfenol (BHT). También algunas aminas aromáticas actúan como antioxidantes, donando un átomo de hidrógeno y estabilizando los radicales que propagan la reacción en cadena de oxidación (figura 9.6). Otros compuestos, como los fenoles impedidos estéricamente (con sustituyentes voluminosos), funcionan de manera similar. Dichos grupos voluminosos protegen el grupo hidroxilo, pero, una vez que reaccionan con un radical libre, forman un radical estable que no puede propagar la cadena (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

Su funcionamiento se basa en interrumpir la reacción en cadena de oxidación, atrapando los radicales libres antes de que puedan dañar significativamente el combustible (figura 9.6).

Figura 9.6. Ejemplos de antioxidantes usados en gasolinas



R = CH₃, terbutil, isopropil

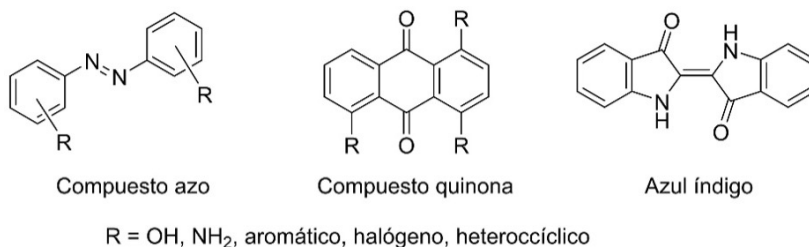
Fuente: elaboración propia.

Trazadores o marcadores:

Son aquellos compuestos, formulaciones o composiciones que “marcan” combustibles a base de hidrocarburos y que tienen la capacidad de ser resistentes a ser removidos del combustible, resistentes a la adulteración, resistentes a la destrucción o descomposición y resistentes al efecto de enmascaramiento. Además, proveen una característica única al combustible, de tal manera que se puede identificar y diferenciar de otros combustibles a base de hidrocarburos con dosificaciones que van desde 20 a 50 ppm (Lewis, 2005). Estos elementos se emplean para identificar diferentes tipos de gasolina de distintos proveedores o para fines fiscales.

A nivel mundial existe un grave problema por el robo de combustibles, lo que conlleva posibles adulteraciones de los hidrocarburos presentes en gasolinas, diésel y otros combustibles derivados del petróleo. Esto se relaciona con otras actividades ilícitas como el contrabando o la venta ilegal de dichos combustibles (Joel y Okoro, 2019). A partir de esta problemática, el marcaje de hidrocarburos ha ganado relevancia en los últimos años, por lo que se han desarrollado grandes líneas de investigación en la creación de moléculas que tengan propiedades de trazabilidad, marcaje y/o diferenciadores, los cuales son detectados mediante diversas técnicas analíticas. Muchos de estos compuestos son colorantes y, en particular, pertenecen a las familias de quinonas o de compuestos azo (figura 9.7).

Figura 9.7. Ejemplos de algunas moléculas empleadas como marcadores o trazadores de combustibles



Fuente: elaboración propia.

Oxigenantes:

Los oxigenantes son quizás los aditivos más conocidos y regulados, cuyo propósito principal es aumentar el índice de octano y, en algunos casos, promover una combustión más completa. Los más comunes son los éteres y los alcoholes (Velázquez, 2024).

Éteres:

El más prominente históricamente fue el metil-tert-butil éter (MTBE). Su estructura química ($\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$) se caracteriza por un átomo de oxígeno unido a dos grupos alquilo, uno metilo y otro tert-butilo. La presencia del oxígeno en la molécula contribuye a la combustión completa y el alto octanaje

se debe a su estructura ramificada y la baja volatilidad en comparación con otros compuestos de alto octanaje. Sin embargo, su alta solubilidad en agua y su persistencia en el medio ambiente llevaron a su eventual prohibición en muchas regiones, incluidas ciertas zonas de México.

Alcoholes:

El etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) es el oxigenante predominante actualmente. Su estructura, con un grupo ($-\text{OH}$), le confiere una mayor afinidad por el agua que el MTBE, lo que puede ser una desventaja. No obstante, su naturaleza renovable y su alto octanaje lo hacen atractivo. El metanol (CH_3OH) es otro alcohol oxigenante, aunque es menos común en la gasolina debido a su corrosividad y toxicidad.

El funcionamiento de los oxigenantes radica en su capacidad para introducir oxígeno en la cámara de combustión, lo que permite una quema más eficiente del combustible y reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO) y partículas. Además, su alto número de octano eleva la resistencia de la gasolina a la detonación prematura, lo que permite mayores relaciones de compresión en el motor y, por ende, mayor eficiencia.

La selección y combinación de estos aditivos son arte y ciencia. Los fabricantes de aditivos invierten vastos recursos en investigación y desarrollo para crear formulaciones sinérgicas, es decir, en las que los componentes trabajen juntos para lograr un efecto mayor que la suma de sus partes individuales. Además, deben ser estables en la gasolina, no reactivos con los materiales del motor y compatibles con las regulaciones ambientales.

Otros aditivos menos comunes pero importantes

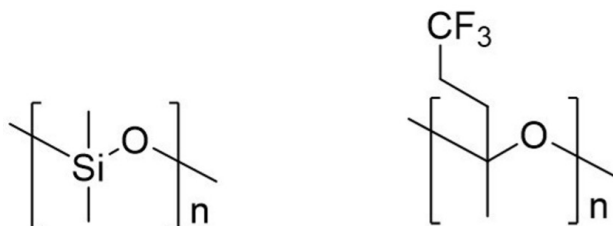
Antiespumantes:

Según la composición de la gasolina (PIONA), a veces la cantidad de hidrocarburos más pesados contribuye a incrementar la viscosidad del combustible. Cuando esto ocurre, es común observar la formación de espuma en el depósito o válvulas de inyección, un fenómeno que tiene implicaciones prácticas y económicas. Aquí es donde los antiespumantes juegan un papel importante.

Son aditivos químicos diseñados con cierto peso molecular para que la espuma que se genera por la presencia de pequeñas burbujas de gas (volátiles

de la gasolina) atrapadas en el líquido actúe reduciendo la tensión superficial del combustible y desestabilizando las películas que forman las burbujas. Esto permite que el gas atrapado se libere más rápidamente, lo que se traduce en un llenado más eficiente del tanque, ya que se aprovecha mejor el volumen disponible para el combustible líquido. Además, al reducir la espuma, se minimizan los efectos del volumen ocupado por esta, lo que puede ocasionar que el tanque de combustible no se llene adecuadamente. Es decir, con el uso de antiespumantes, se optimiza el proceso de dispensado en las estaciones de servicio. En esencia, estos compuestos, a menudo basados en siliconas o aceites con partículas hidrofóbicas, no sólo facilitan una operación más limpia y segura, sino que también permiten cargar una mayor cantidad de combustible en los vehículos, optimizando así la autonomía y la experiencia de repostaje. Su dosificación va de 2 a 10 ppm (figura 9.8) (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

Figura 9.8. Estructuras generales de algunos antiespumantes empleados en gasolinas



Fuente: elaboración propia.

Desemulsificantes:

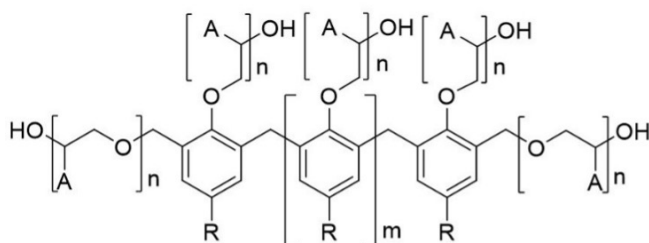
Ayudan a separar el agua del combustible, previniendo la formación de emulsiones estables. Son tensioactivos que alteran la interfaz entre el agua y el combustible. La introducción de agua dentro del combustible es indeseable; sin embargo, esto puede ocurrir durante condiciones climáticas desfavorables desde el punto de vista del sistema de distribución, desde la refinería, o bien, por condensación, donde se almacena en las estaciones de servicio hasta el tanque de combustible del vehículo. Con la agitación, particularmente

en presencia de otros aditivos, el agua puede quedar atrapada en forma de emulsión (agua en aceite) estable dentro del combustible. Los problemas asociados con las emulsiones son la obstrucción de los filtros de combustible, la promoción del crecimiento microbiano y la corrosión. La apariencia turbia del combustible también es evidente, lo que puede reducir su valor.

Los desemulsificantes, como su nombre lo indica, son agentes que rompen emulsiones y se aplican a los combustibles. Estos aditivos se pueden añadir al combustible turbio durante el almacenamiento para romper rápidamente emulsiones que, de otro modo serían estables, y permitir la eliminación del agua del combustible. Los desemulsificantes también previenen la formación de emulsiones estables que se aplican a aceites lubricantes y de otro tipo. Químicamente hablando, están diseñados específicamente para funcionar con otros componentes del paquete de aditivos con el objetivo de evitar que la mezcla de combustible y la formulación del paquete formen emulsiones con el agua que entra en contacto con los sistemas de distribución de combustible (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

De tal manera, su mecanismo de acción consiste en modificar la tensión interfacial de la película de las gotas de agua en una emulsión de combustible. Esto permite la coalescencia y la separación de las gotas de agua del combustible. Las dosis recomendadas para romper emulsiones existentes suelen ser de 10 a 500 ppm, o bien, para casos preventivos de emulsión, de 1 a 10 ppm (figura 9.9).

Figura 9.9. Ejemplo de una resina poli-fenólica que se emplea como desemulsificante en gasolinas



A = H, CH₃, R = alquil

Fuente: elaboración propia.

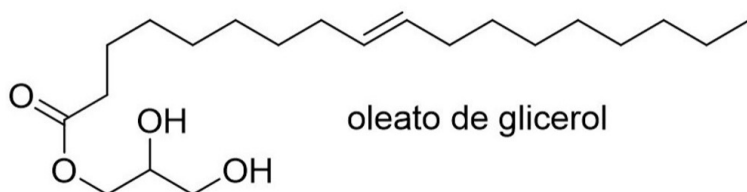
Reductores de fricción:

Se utilizan ampliamente en los paquetes de aditivos para lubricantes del motor. Desde el punto de vista de la química, se trata de estructuras lineales de hidrocarburos con un grupo polar. Los grupos de cabeza polar típicos incluyen aminas, amidas y sus derivados, o ácidos carboxílicos y sus derivados. Éstos grupos polares son atraídos por superficies metálicas, como las paredes de los cilindros y las superficies de fricción de los segmentos de pistón, donde forman enlaces relativamente fuertes, mientras que la larga cadena de hidrocarburo permanece solubilizada en la película de aceite lubricante.

Tanto la naturaleza del grupo de cabeza polar como la estructura de la cadena de hidrocarburos influyen significativamente en la reducción de la fricción. Reducen la fricción en el motor, mejorando la eficiencia del combustible. En otras palabras, forman una película (semejante a los inhibidores de corrosión), pero con la diferencia de que permiten que el combustible fluya de mejor manera a través de las paredes metálicas de los cilindros y las superficies de los segmentos de los pistones. También evitan la pérdida de potencia por fricción en los motores de combustión interna. Esta pérdida de potencia se debe a la fricción viscosa del lubricante en la película que separa las partes móviles del motor (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

Es decir, se reduce la fricción facilitando el deslizamiento de las superficies metálicas. La película de reductores de fricción adsorbida en las superficies metálicas proporciona una región de menor cizallamiento durante el movimiento relativo. Una menor fricción derivada de la reducción de la fricción puede resultar en una mayor potencia del motor y/o ahorro de combustible. Las dosis típicas de tratamiento se encuentran entre 50 y 300 ppm (figura 9.10) (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 2013).

Figura 9.10. Estructura del oleato de glicerol que se emplea como reductor de fricción



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Como se ha discutido a lo largo de este capítulo, observamos que los aditivos para gasolina son mucho más que simples “aditivos” o “mejoradores”. Son el resultado de investigación en química sofisticada, donde cada molécula se diseña con una estructura particular para resolver un problema específico asociado al combustible, al motor o alguna condición que se experimenta a lo largo de la vida útil del motor, desde asegurar una combustión limpia y eficiente hasta proteger contra la corrosión y la degradación del combustible. Estos compuestos químicos, aunque invisibles en el tanque, son esenciales para el rendimiento, la durabilidad y la sostenibilidad de los vehículos modernos. Comprender su química es comprender una etapa crucial de la tecnología que impulsa nuestra sociedad, sobre todo, se trata de comprender la importancia que juega cada uno de ellos al usar uno de los combustibles más usados en la vida cotidiana: la gasolina. Además, ahora sabemos que la gasolina que se despacha en las estaciones de servicio ya contiene una mezcla básica de aditivos exigida por la regulación mexicana, por lo que no necesitamos comprar ni adicionar ningún aditivo extra.

Referencias

- ASTM International. (s. f.). ASTM D5500: Standard test method for vehicle evaluation of unleaded automotive spark-ignition engine fuel for intake valve deposit formation. Recuperado el 14 de julio de 2025, de <https://store.astm.org/d5500-98r14.html>
- ASTM International. (s. f.). ASTM D5598: Standard test method for evaluating unleaded automotive spark-ignition engine fuel for electronic port fuel injector fouling. Recuperado el 14 de julio de 2025, de <https://store.astm.org/d5598-20.html>
- Bennett, J. (2014). 7—Advanced fuel additives for modern internal combustion engines. En R. Folkson (Ed.), *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* (pp. 165-194). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.1.165>
- Cerón-Camacho, R., Cisneros-Dévora, R., Martínez-Magadán, J.-M., Servín-Nájera, A. G., Ramírez-Pérez, J. F., Hernández-Altamirano, R., Zamudio-Rivera, L. S., y Oviedo-Roa, R. (2019). Quantum molecular design and experimental testing of a high-performance zwitterionic corrosion inhibitor for oxidized iron surfaces. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 93, 107444. <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2019.107444>
- U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). Fuel effects on vehicle emissions. Recuperado el 9 de julio de 2025, de <https://www.epa.gov/moves/fuel-effects-vehicle-emissions>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (s. f.). IMP-ALICIM®. Recuperado el 28 de julio de 2025, de <https://www.gob.mx/imp/articulos/imp-alicim>
- Joel, G., y Okoro, L. N. (2019). Recent Advances in the Use of Sensors and Markers for Fuel Adulteration Detection: A Review. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 6(11).
- Kümmerer, K. (2011). 3.04—Emerging Contaminants. En P. Wilderer (Ed.), *Treatise on Water Science* (pp. 69-87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00052-X>
- Lewis, D. M. (2005). Hydrocarbon markers (European Union Patent No. EP1580254A2). <https://patents.google.com/patent/EP1580254A2/en>
- Martínez Palou, R., y Cerón Camacho, R. (2023). *Entendiendo la Industria Petrolera* (1.ª ed.). Amazon.
- American Chemical Society. (s. f.). New octane booster molecules for modern gasoline composition. *Energy & Fuels*. Recuperado el 28 de julio de 2025, de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00912>
- Comisión Reguladora de Energía. (2016). NOM-016-CRE-2016: Especificaciones de calidad de los petrolíferos. *Diario Oficial de la Federación*.
- Oviedo-Roa, R., Ramírez-Pérez, J. F., Servín-Nájera, A. G., Mena-Cervantes, V. Y., Martínez-Magadán, J. M., Cerón-Camacho, R., Cisneros-Dévora, R., Soto-Castruita, E., y Zamudio-Rivera, L. S. (2022). Quantum molecular modeling of oxazolidines as detergent-dispersant additives for gasoline: A valuable technological adviser. *Fuel*, 315, 122715. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122715>
- Stauffer, E., Dolan, J. A., y Newman, R. (2008). CHAPTER 7—Flammable and Combustible

Liquids. En E. Stauffer, J. A. Dolan, & R. Newman (Eds.), *Fire Debris Analysis* (pp. 199-233). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50011-7>

Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe. (2013). *Fuel additives: Use and benefits*.

Velasco, A., y García, G. (2025). La calidad de los combustibles en México. Impactos locales en la salud y el medio ambiente. Centro Mexicano de Derecho Ambiental.

Velázquez, H. D. (Ed.). (2024). *Catalytic Processes for the Production of Automotive Gasoline*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003517283>