

LUBRICANTES AUTOMOTRICES: IMPORTANCIA Y RECUPERACIÓN PARA IMPULSAR LA SOSTENIBILIDAD

AUTOMOTIVE LUBRICANTS: IMPORTANCE AND RECOVERY TO BOOST SUSTAINABILITY

María Teresa Hernández Sierra

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
teresa.hs@irapuato.tecnm.mx

Karla Judith Moreno Bello

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
karla.moreno@itcelaya.edu.mx

J. Santos García Miranda

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
santos.garcia@itcelaya.edu.mx

Viridiana Guadalupe García López

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
viridiana.gl@irapuato.tecnm.mx

Francisco Fernando Torres Chimal

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
francisco.tc@irapuato.tecnm.mx

Recepción: 14/noviembre/2024

Aceptación: 20/diciembre/2024

Resumen

La lubricación es esencial para el funcionamiento eficiente y prolongado de los vehículos. Con millones de automóviles operando en todo el mundo, partes móviles como el motor, la transmisión y los sistemas de dirección dependen de una lubricación adecuada para reducir el desgaste, minimizar la fricción y prevenir el sobrecalentamiento. Sin embargo, la producción y eliminación de lubricantes presentan desafíos ambientales y daños a la salud significativos. Cada año, en México, se generan más de 325 millones de litros de aceite usado provenientes de los motores de gasolina y diésel de automóviles y vehículos de transporte. Lamentablemente, una gran parte de este aceite no recibe el manejo adecuado. La regeneración y re-refinación de aceites usados recuperados son dos procesos que buscan mitigar estos impactos, restaurando en cierta medida sus propiedades para

su reutilización. En este trabajo se aborda un análisis sobre la importancia y el efecto que tienen la regeneración y re-refinación en las propiedades reológicas (viscosidad) y tribológicas (fricción y el desgaste) de los aceites usados.

Palabras Clave: Automóvil, Lubricante, Regeneración, Re-refinación, Tribología.

Abstract

Lubrication is essential for the efficient and long-term operation of vehicles. With millions of cars operating worldwide, moving parts such as the engine, transmission, and steering systems depend on adequate lubrication to reduce wear, minimize friction, and prevent overheating. However, the production and disposal of lubricants present significant environmental challenges and health damage. Every year in Mexico, more than 325 million liters of used oil are generated from gasoline and diesel engines in cars and transportation vehicles. Unfortunately, much of this oil is not managed properly. Regeneration and re-refining of recovered used oils are two processes that seek to mitigate these impacts, restoring to some extent their properties for reuse. This paper discusses the importance and effect that regeneration and re-refining have on the rheological (viscosity) and tribological (friction and wear) properties of used oils.

Keywords: Automobile, Lubricant, Regeneration, Re-refining, Tribology.

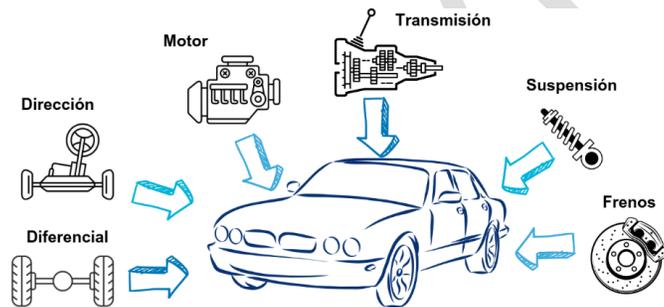
1. Introducción

En la actualidad, los automóviles son el principal medio de transporte en diversas regiones del mundo [Miner y cols., 2024], desempeñando un papel fundamental en el fortalecimiento de las actividades económicas de cualquier país al servir como un vínculo esencial entre la producción, el mercado y los servicios [Romero y cols., 20]. La cantidad de vehículos que circulan actualmente en el planeta puede ser incontable, sin embargo, estimaciones recientes apuntan que existen 16 automóviles por cada 100 personas y que en total existen alrededor de 2 mil millones de vehículos de motor en circulación, de los cuales alrededor de 1.3 mil millones son automóviles [Miner y cols., 2024]. Esta cifra va incrementando año con año, por ejemplo, en 2023, se produjeron unos 94 millones de vehículos

de motor en todo el mundo, siendo China, Japón y Alemania los mayores productores de automóviles y vehículos comerciales [Placek, 2024].

Estos vehículos motorizados son propulsados ya sea por un motor de combustión interna, un motor eléctrico, o alguna combinación de los dos (vehículos híbridos). Sin embargo, los vehículos más utilizados y disponibles hoy en día siguen siendo aquellos propulsados por un motor de combustión interna.

Para poder generar el movimiento, los automóviles cuentan con diversas partes móviles que cumplen con una función específica. Estas incluyen componentes clave del motor, la transmisión, y el sistema de dirección, entre otros. Cada una de estas piezas debe operar de manera precisa y coordinada para asegurar un rendimiento óptimo y seguro del automóvil. La Figura 1 ilustra algunas de las principales partes móviles de los automóviles.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Principales partes móviles de un automóvil.

El buen estado y el mantenimiento de las partes móviles son cruciales, ya que cualquier fallo puede llevar a un aumento del desgaste, disminución de la eficiencia, y posibles averías que no solo comprometen la operación del vehículo, sino también la seguridad del conductor y los pasajeros. Para garantizar la integridad, el funcionamiento eficiente, y prolongar la vida útil del vehículo y sus componentes, se requiere de lubricantes ya sea en forma de grasas o líquidos de acuerdo con las funciones y necesidades de cada una de ellas. Asimismo, la frecuencia de cambio de estas sustancias puede variar dependiendo del tipo de componente y del uso del automóvil. En la Tabla 1 se mencionan los tipos de lubricantes más comunes empleados para proteger cada parte móvil de los vehículos, así como una

recomendación general para su reemplazo. Es importante resaltar que estas son recomendaciones usuales y es importante seguir las especificaciones del fabricante del vehículo, que se pueden encontrar en el manual del propietario.

Tabla 1 Tipos de lubricantes y recomendaciones generales para los vehículos.

| Parte móvil del vehículo | Lubricante empleado | Recomendación general para su reemplazo |
|--------------------------|---|--|
| Motor | Se utilizan aceites de motor, que pueden ser minerales, sintéticos o semisintéticos. Estos aceites están formulados con aditivos que ayudan a reducir la fricción, limpiar el motor y proteger contra la corrosión y el desgaste. | Convencional: Cada 5,000 a 7,500 km o 6 meses. |
| | | Sintético: Cada 10,000 a 15,000 km o 12 meses. |
| Transmisión | Automática: Aceite de transmisión automática (ATF), que está diseñado para soportar las altas temperaturas y presiones dentro de una transmisión automática. | Automática: Cada 40,000 a 60,000 km. |
| | Manual: Aceite de transmisión manual (MTF) o aceite para engranajes, que proporciona la lubricación necesaria para los engranajes y cojinetes dentro de una transmisión manual. | Manual: Cada 80,000 a 100,000 km. |
| Diferencial | Se utiliza aceite para engranajes (GL-5), que es más espeso y está diseñado para proteger los engranajes bajo altas cargas y presiones. | Cada 40,000 a 60,000 km, dependiendo del tipo de conducción y condiciones de uso. |
| Sistema de Dirección | Dirección asistida: Líquido de dirección asistida, que actúa como fluido hidráulico para transmitir la fuerza y lubricar las partes móviles del sistema de dirección asistida. | Revisión cada 40,000 km y cambio según sea necesario, generalmente cada 80,000 km. |
| Frenos | Líquido de frenos, que no es un lubricante en el sentido tradicional, pero es crucial para la operación de los frenos hidráulicos. | Cada 2 años o 40,000 km, lo que ocurra primero. |
| | Para las partes móviles del sistema de frenos, como los pistones de las pinzas de freno, se utilizan lubricantes específicos resistentes a altas temperaturas y a los productos químicos presentes en el sistema de frenos. | |
| Suspensión | En las juntas y puntos de pivote se utilizan grasas lubricantes que pueden soportar la carga y las condiciones ambientales, como la grasa de bisulfuro de molibdeno. | Revisión durante los mantenimientos regulares y reengrase según sea necesario, generalmente cada 30,000 a 40,000 km. |
| Rodamientos y Cojinetes | Generalmente se utilizan grasas específicas para rodamientos, que son capaces de soportar altas cargas y temperaturas, y proporcionar una lubricación duradera. | |
| Componentes Menores | Se utilizan lubricantes en aerosol, que protegen contra la humedad y el óxido. | |

Fuente: elaboración propia.

Los lubricantes reducen la fricción entre componentes, minimizando el desgaste y evitando el sobrecalentamiento que puede dañar el motor y otras partes esenciales.

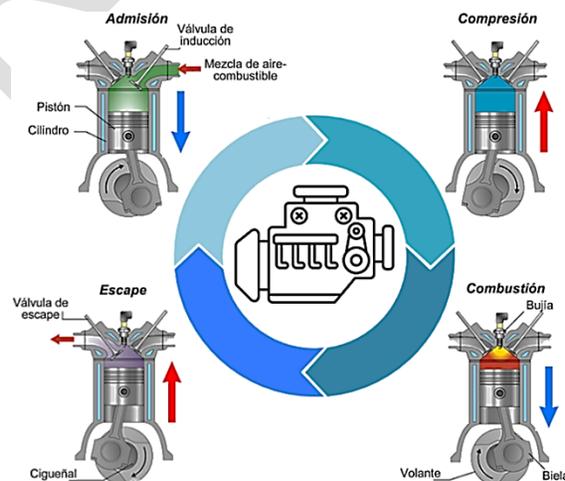
Además, ayudan a mantener las superficies limpias y a prevenir la corrosión, lo que garantiza un rendimiento óptimo y confiable. Sin una adecuada lubricación, las piezas móviles estarían expuestas a un mayor desgaste, fallo prematuro y costos de mantenimiento elevados.

Los vehículos de combustión interna requieren aceite para lubricar el motor y sus demás componentes como se describe en la Tabla 1. Los vehículos eléctricos tienen menos componentes mecánicos en comparación con los de motor de combustión interna, pero aún necesitan lubricantes para motores eléctricos y para sus componentes como engranajes, ejes y rodamientos. Por su parte, los vehículos híbridos, requieren lubricantes para ambos motores. El consumo de aceite de los vehículos híbridos podría ser similar o ligeramente menor al de los vehículos de combustión interna dependiendo de la eficiencia del motor eléctrico.

2. Importancia y recuperación de lubricantes para motor

Motor de combustión interna

El motor es conocido como el corazón del vehículo, y como tal requiere un cuidado muy especial. Dentro del motor de combustión interna existen a su vez diversas partes fijas y móviles para poder generar la energía de combustión y convertirla en energía mecánica de movimiento como se ilustra en la Figura 2 para el caso de un motor de cuatro tiempos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Ciclo de funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos.

El proceso comienza con la *admisión*, donde una mezcla de aire y combustible ingresa al cilindro. Las válvulas controlan la entrada de aire y combustible, controladas a su vez por el árbol de levas. Luego, durante la *compresión*, los pistones se mueven dentro de los cilindros del motor para comprimir la mezcla aire-combustible hacia arriba. En la fase de *combustión*, la chispa de las bujías enciende la mezcla comprimida, provocando una explosión que empuja los pistones hacia abajo, generando trabajo mecánico. Finalmente, en la fase de *escape*, los pistones vuelven a subir, expulsando los gases de combustión a través de las válvulas de escape. Este ciclo se repite rápidamente, produciendo energía continua que se convierte en movimiento. Las bielas conectan los pistones con el cigüeñal, quien convierte el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotativo el cual se transmite a las ruedas del vehículo. En cada una de estas etapas, los fenómenos de fricción y desgaste están presentes debido al rozamiento.

No toda la energía producida por la combustión se transforma en trabajo útil, se estima que solo el 21.5% de la energía del combustible es aprovechada para mover el automóvil [Holmberg y cols., 2012]. Esto se debe principalmente a tres grandes grupos de pérdidas de energía: pérdidas de calor al exterior y a fluidos refrigerantes, pérdidas mecánicas, y pérdidas asociadas a los gases de escape. En los automóviles de pasajeros, por ejemplo, un 33% de la energía del combustible se utiliza para superar la fricción en el motor, la transmisión, los neumáticos y los frenos [Holmberg y cols., 2012]. De esta, el 28% corresponde a las pérdidas por fricción directa, sin contar la fricción de frenado [Holmberg y cols., 2012]. Asimismo, la mayor pérdida de energía por fricción en los componentes de automóviles que funcionan a una velocidad constante es el motor [Ludema, 1984]. Por ello, al buscar reducir de las pérdidas por fricción se podría conducir a una mejora triple del ahorro de combustible, ya que induciría a reducir tanto las pérdidas de escape como las de refrigeración en la misma proporción [Holmberg y cols., 2012].

Actualmente, las posibles acciones para disminuir la fricción incluyen la aplicación de recubrimientos avanzados y técnicas de texturizado en superficies de componentes del motor y la transmisión, el uso de lubricantes y aditivos de baja viscosidad y bajo cizallamiento, y el diseño de neumáticos que minimicen la fricción

de rodadura. Esto no sólo por razones económicas, sino también para ayudar a reducir las emisiones de CO_2 y su efecto negativo al medio ambiente.

Lubricantes para el motor de combustión interna

Los lubricantes, al ser uno de los mecanismos principales para reducir la fricción en los motores de los automóviles. Éstos deben de cumplir con ciertas funciones que a continuación se describen [Caines y cols., 2004]:

- Reducir la fricción. En otras palabras, los lubricantes deben facilitar el movimiento. Menos fricción significa que el motor y otras partes pueden funcionar con mayor eficiencia y menos esfuerzo. Esto reduce los requisitos de energía para operar el mecanismo y reduce la generación de calor local.
- Reducir el desgaste. Los lubricantes deben de crear una película entre las partes móviles, minimizando el contacto directo y reduciendo el desgaste. Con ello, se busca mantener el equipo funcionando durante más tiempo y de manera eficiente.
- Enfriamiento. Los lubricantes deben ayudar a disipar el calor generado por el movimiento y la fricción, evitando el sobrecalentamiento. En un motor, el lubricante es un agente de transferencia de calor inicial entre algunas partes calentadas por combustión (pistones) y los sistemas de disipación de calor (cárter, camisa de refrigeración). Además, y en otros sistemas, el lubricante disipa el calor generado por la fricción o el trabajo mecánico realizado.
- Proteger contra la corrosión: Los lubricantes deben de formar una barrera protectora que prevenga la oxidación y corrosión de las piezas metálicas. Además, los lubricantes deben evitar volverse ácidos y corroer los metales ya sea por su propia degradación o por contaminación de la combustión.
- Ser agentes limpiadores. Los lubricantes deben ayudar a mantener limpias las partes internas del motor, evitando la acumulación de residuos y partículas, ya sean por propios productos de degradación o por la contaminación de la combustión.
- Proveer sellamiento. Los lubricantes deben ayudar a formar los sellos entre los pistones y los cilindros de forma continua y económica.

Para cumplir con los requerimientos mencionados, los lubricantes automotrices constan de una base (compuesta por aceites de origen mineral, sintético o natural) y aditivos con distintas funciones los cuales pueden abarcar hasta un 30% del lubricante [Hernández-Sierra, y cols., 2022]. Estos aditivos se agregan para mejorar ciertas propiedades, sin embargo, para obtener un buen desempeño, debe de existir buena sinergia entre todos ellos y el aceite base. Los aceites modernos, en particular los aceites de motor contienen cantidades considerables de aditivos, así como varias bases lubricantes [Caines y cols., 2004]. Los primeros lubricantes eran de base natural, incluyendo aceites y grasas de origen vegetal o animal. Sin embargo, los lubricantes derivados del petróleo se convirtieron las bases más comunes por su alta disponibilidad y relativo bajo costo. Aunque cada vez más se utilizan cantidades de otros fluidos químicos como sustitutos parciales o totales de los aceites minerales. Por ejemplo, las bases sintéticas, las cuales fueron introduciéndose en el mercado gracias a su rendimiento superior. Estas bases sintéticas también se originan de materias primas del petróleo, pero debido a que se han derivado de una variedad de procesos químicos adicionales, se les ha asignado el término "sintéticos" [Caines y cols., 2004].

Por otro lado, el primer aditivo se puede considerar el aceite mineral, el cual se agregaba a los lubricantes naturales para mejorar sus propiedades. Posteriormente, se intercambiaron los roles, las grasas y aceites de origen natural funcionaron como aditivos para los aceites minerales debido a que proporcionaban "lubricidad" a los aceites minerales [Caines y cols., 2004]. Sin embargo, a partir de la década de 1930, surgieron los aditivos depresores del punto de fluidez, modificadores de viscosidad, antioxidantes, dispersantes, detergentes, anti-desgaste, modificadores de fricción, inhibidores de óxido y corrosión, emulsificantes, desemulsionantes, antiespumantes, entre otros.

Debido a la diversidad de bases y aditivos, hoy en día hay una gran variedad de lubricantes para motor disponibles en el mercado de acuerdo con las diferentes necesidades y condiciones de operación, así como a los avances tecnológicos y las especificaciones de los fabricantes de automóviles. Las diferencias entre estos lubricantes se basan en varios factores clave como el tipo de aceite base, la

viscosidad, aditivos, condiciones de operación que soportan. Esta variedad permite a los consumidores seleccionar el lubricante más adecuado para su vehículo y sus necesidades.

Clasificación de los lubricantes para motor

La clasificación de los lubricantes está estrechamente relacionada con la especificación y la aprobación. La clasificación divide los lubricantes en tipos generales para satisfacer las diversas necesidades de los usuarios. Normalmente, una clasificación incluye una descripción del tipo de motor para el cual se diseña el aceite, a veces el tipo de vehículo y, en ocasiones, una referencia a los años de garantía aplicables. Se destacan características especiales, como la viscosidad o las propiedades de ahorro de energía, entre otras [Caines y cols., 2004].

El sistema de clasificación *SAE*, según la Sociedad de Ingenieros de Automoción, clasifica los aceites en función de su viscosidad, es decir, la medida de la resistencia del aceite a fluir bajo diferentes condiciones. Los grados *SAE* se dividen en aceites para motor y para transmisión. En los aceites de motor, los grados *SAE* incluyen un número seguido de una "W" y luego otro número. El primer número indica la viscosidad a baja temperatura, la "W" hace referencia a "Winter" (invierno), y el segundo número la viscosidad a alta temperatura. Por ejemplo, un aceite de motor *SAE 10W – 30* tiene una viscosidad de 10 *cSt* en frío y 30 *cSt* en caliente. A los lubricantes cuya designación indica las dos viscosidades se les conoce como aceites multigrado. Por el contrario, si solo indica un valor de viscosidad, se les denomina aceites monogrado. Ejemplos de aceites monogrados son el *SAE 10W* que tiene una viscosidad de 10 *cSt* adecuado para invierno; y el *SAE 40*, que tiene una viscosidad de 40 *cSt*, al no tener indicada la "W", significa que es apropiado para el verano. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de lubricantes de acuerdo con la *SAE*. Por otro lado, el sistema de especificación de los aceites de motor *API*, según el Instituto Americano del Petróleo, indica la calidad y el rendimiento del aceite. Su clasificación consta de dos letras, la primera indica el tipo de motor para el cual está diseñado el aceite (*API S* para motores de gasolina y *API C* para motores diésel), y la segunda indica la categoría de rendimiento del aceite.

Tabla 2 Clasificación de lubricantes para motores automotrices de acuerdo con la SAE.

| Aceite Multigrado | Aceite Monogrado | |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| SAE NWN Ejemplo: SAE 10W30 | SAE NW Ejemplo: SAE 10W | SAE N Ejemplo: SAE 40 |

Fuente: Elaboración propia.

Las categorías de servicios de API actuales y obsoletos para motores de combustión interna de gasolina se resumen en la Tabla 3. En el caso de los motores de gasolina para automóviles, la última categoría de servicio de aceite de motor incluye las propiedades de rendimiento de cada categoría anterior. Si el manual del propietario de un automóvil requiere un aceite API SN, un aceite API SP brindará una protección completa [API, 2020].

Impacto ambiental de los lubricantes

En los últimos años, las preocupaciones por el cambio climático han aumentado considerablemente debido a problemas como la contaminación del aire, la baja calidad del agua, el peligro para la vida silvestre, el calentamiento global, la lluvia ácida, la eficiencia y el ahorro de energía, y el agotamiento de los recursos naturales causado por el consumismo predominante.

Tabla 3 Clasificación de lubricantes para motores automotrices según el API.

| Categorías Actuales | Categorías Obsoletas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • SP: Introducida en mayo de 2020, ofrece protección contra la pre-ignición a baja velocidad (LSPI), protección contra el desgaste de la cadena de distribución, mejor protección contra depósitos a alta temperatura en pistones y turbocompresores, y un control más estricto del lodo y barniz. • SN: Para motores automotrices de 2020 y anteriores. • SM: Para motores automotrices de 2010 y anteriores. • SL: Para motores automotrices de 2004 y anteriores. • SJ: Para motores automotrices de 2001 y anteriores. | SH SG SF SE SD SC SB SA |

Fuente: Elaboración propia.

La industria de los lubricantes tiene un gran impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de estos productos. En la etapa de fabricación, que incluye la producción de

fluidos base, aditivos y la formulación, el daño ambiental es causado principalmente por los propios procesos y el mal manejo de materias primas, reactivos químicos, productos terminados y residuos peligrosos para la salud humana y los ecosistemas. Las industrias de lubricantes minerales, por ejemplo, contribuyen a la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, así como a las emisiones de gases contaminantes, partículas y ruido [Vale-Capdevila y cols. 2016]. Además, los lubricantes representan una carga ambiental considerable durante y después de su uso. Los aceites lubricantes usados contienen metales pesados y compuestos químicos dañinos los cuales pueden causar efectos negativos en la salud y en el medio ambiente [Sánchez-Alvarracín y cols., 2021].

Datos de Estados Unidos muestran que el 52% de los lubricantes se pierden por derrames, fugas o emisión de derivados de aceites parcialmente quemados en los escapes de automóviles. Del 48% restante, se estima que al menos el 25% se queman o se eliminan ilegalmente, mientras que el resto se recoge para ser refinado o quemado como combustible [Sánchez-Alvarracín y cols., 2021]. Por su parte, en 2018, la Unión Europea recolectó 1.6 millones de toneladas de aceite usado. Del cual, aproximadamente el 61% fue regenerado y convertido nuevamente en aceite base, mientras que el 39% restante se destinó a la recuperación energética, ya sea transformado en combustible o incinerado directamente [Klenert y cols., 2024].

Una combustión inadecuada de 5 l de aceite usado podría contaminar el aire en una cantidad equivalente a lo que necesita una persona para vivir durante más de tres años. Asimismo, la liberación de *Cr* y sus compuestos al quemar aceite usado puede causar ciertos tipos de cáncer [Sánchez-Alvarracín y cols., 2021; **Error! Marcador no definido.**]. Lo anterior subraya la urgencia de adoptar lubricantes más biodegradables, menos tóxicos y con una mayor durabilidad. Además, es fundamental promover la regeneración y re-refinación de estos, ya que estos procesos no solo contribuyen a una gestión más sostenible de los recursos, sino que también reducen la cantidad de residuos peligrosos y disminuyen la demanda de nuevas materias primas. Esto juega un papel crucial en el modelo de la economía circular, el cual busca eliminar los residuos y promover la sostenibilidad a través de la reutilización y la eficiencia de los recursos.

Regeneración y re-refinación de aceites usados

La regeneración de aceites juega un papel crucial en la sostenibilidad y eficiencia medioambiental en la industria de los lubricantes. Este proceso implica la recolección de aceites usados y su tratamiento para eliminar contaminantes y restaurar parcialmente sus propiedades originales, permitiendo su reutilización en aplicaciones industriales menos críticas. Utiliza procesos fisicoquímicos, como la sedimentación, filtración, deshidratación y destilación, para eliminar contaminantes como partículas, agua y algunos aditivos degradados. Los beneficios incluyen la reducción de la demanda de petróleo crudo, así como la disminución de residuos peligrosos y la minimización de las emisiones contaminantes.

Algunas empresas, en un intento de reducir y reutilizar las grandes cantidades de lubricantes usados que generan sus procesos, realizan la regeneración de estos aceites mediante procesos fisicoquímicos para eliminar los contaminantes y lo mezclan con aceites nuevos para utilizarse en motores de combustión interna o en otras aplicaciones industriales como engranajes, fluidos de corte y lubricantes para laminación de metales. Sin embargo, para su reutilización en motores de combustión interna es necesario re-refinar los aceites lubricantes [Sánchez-Alvarracín y cols., 2021].

La re-refinación de aceites lubricantes es la restauración completa del aceite usado a un estado similar al del aceite nuevo, permitiendo su reutilización en aplicaciones críticas, como motores de combustión interna y transmisiones de vehículos. Implica un proceso más complejo que puede incluir etapas avanzadas como el craqueo, hidrogenación y separación molecular para eliminar completamente los contaminantes y restaurar el aceite base. También se añaden nuevos aditivos para cumplir con las especificaciones de rendimiento. El proceso de re-refinación de aceites usados es más eficiente que la refinación del petróleo crudo virgen, lo que reduce aproximadamente un 90% los impactos ambientales que resultarían de la producción de aceites lubricantes [Sánchez-Alvarracín y cols., 2021]. Además, contribuye a una economía circular al dar una segunda vida a los aceites lubricantes, lo cual es vital para conservar los recursos naturales y reducir el impacto ambiental negativo asociado con la producción y eliminación de aceites nuevos.

Existen varios programas regulatorios a nivel mundial para la gestión y regeneración de lubricantes. Por ejemplo, en Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido normativas para la gestión adecuada de aceites usados, incluyendo la regeneración y reciclaje. Asimismo, la Unión Europea tiene regulaciones estrictas sobre la gestión de aceites usados, promoviendo la regeneración y el reciclaje para reducir el impacto ambiental. En México, existe la Estrategia Nacional de Mejora Regulatoria, la cual busca mejorar la gestión y regeneración de lubricantes, para promover el crecimiento económico y el bienestar social. Estos programas buscan asegurar que los aceites usados sean manejados de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Actualmente, existen algunas empresas que se dedican a la regeneración de aceites lubricantes a nivel mundial. Por ejemplo, SKF RecondOil, es una empresa especializada en la gestión de lubricantes que ofrece soluciones para la recuperación y regeneración de aceites usados en diversas industrias. Pulse Energy, es una empresa mexicana se enfoca en la recolección, reciclaje y regeneración de aceites usados, garantizando su reutilización en industrias como la automotriz y la química. Asimismo, EYL (US Technologies), con sede en México, se dedica a la regeneración de aceites lubricantes usados mediante tecnologías avanzadas para proporcionar productos y servicios de alto valor técnico, económico y ecológico. La regeneración y re-refinación de lubricantes implica costos iniciales significativos para la inversión en equipos, operación y transporte, pero ofrece beneficios económicos y ambientales que suelen superar estos costos.

Propiedades reológicas y tribológicas de los lubricantes

Las propiedades reológicas determinan cómo se comportan los materiales cuando se les aplican fuerzas y deformaciones. En los lubricantes, estas propiedades son esenciales para evaluar su rendimiento bajo diversas condiciones operativas. Algunas propiedades reológicas más relevantes son:

- **Viscosidad:** Es la resistencia de un fluido a fluir. Los aceites con alta viscosidad fluyen más lentamente que los fluidos con baja viscosidad, como el agua. Esta propiedad es crucial para que el lubricante forme una película protectora entre

superficies metálicas en movimiento. Los lubricantes deben mantener una viscosidad adecuada en temperaturas bajas para garantizar un arranque eficaz del motor y en temperaturas altas para asegurar protección y eficiencia.

- Índice de Viscosidad: Este índice mide cómo varía la viscosidad del lubricante con la temperatura. Un lubricante con un alto índice de viscosidad proporciona una protección más consistente en una amplia gama de temperaturas.
- Punto de Fluidéz: Es la temperatura más baja a la que un lubricante puede fluir. Esta propiedad es fundamental para asegurar que el lubricante mantenga su fluidez en climas fríos, permitiendo un arranque adecuado del motor.

Estas propiedades son vitales para garantizar que los lubricantes funcionen eficientemente bajo diferentes condiciones, protegiendo las piezas del motor y prolongando su vida útil. Por otro lado, las propiedades tribológicas se refieren al comportamiento de los materiales en contacto bajo condiciones de fricción, desgaste y lubricación. Estas propiedades son una respuesta de todo el sistema, no de un material, lubricante, o condición en particular. En el caso de los lubricantes, las propiedades tribológicas son fundamentales para asegurar su eficacia en la reducción de la fricción y el desgaste, asegurando un funcionamiento más eficiente, fiable y duradero de los motores y otros sistemas mecánicos, reduciendo la necesidad de mantenimiento y prolongando la vida útil de los componentes. Las principales propiedades tribológicas son:

- Fricción: El coeficiente de fricción es una medida que indica la resistencia al movimiento que existe entre dos superficies en contacto. Este coeficiente se define como la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal que actúa entre las superficies. Se representa con la letra griega μ . Un coeficiente de fricción alto significa mayor fricción, mientras que un coeficiente bajo indica que las superficies se deslizan más fácilmente entre sí. Los lubricantes deben minimizar la fricción entre las superficies metálicas en movimiento. Esto se consigue mediante la formación de una película lubricante que separa las superficies y reduce la resistencia al movimiento.

- **Desgaste:** El desgaste es el deterioro gradual de las superficies de los materiales en contacto debido a la fricción y el movimiento relativo entre ellas. Este proceso puede ocurrir en diversas formas (mecanismos de desgaste) y es un factor crítico en la durabilidad y eficiencia de los componentes mecánicos. El desgaste puede reducirse significativamente mediante el uso de lubricantes adecuados, que forman capas protectoras en las superficies metálicas, evitando el contacto directo y reduciendo el desgaste mecánico.

En la literatura científica se pueden encontrar datos experimentales sobre el comportamiento reológico y tribológico de distintos lubricantes. Sin embargo, actualmente existe una significativa insuficiencia de información sobre cómo se comportan estos lubricantes después de someterse a procesos de regeneración o re-refinación. En la tabla 4 se muestran algunas de estas propiedades reportadas para lubricantes sometidos a procesos de regeneración o re-refinación y su comparación con el lubricante nuevo y/o usado.

Tabla 4 Propiedades reológicas y tribológicas de lubricantes sometidos a procesos de regeneración o re-refinación.

| Referencia | | [Wang y cols., 2013] | [Velasco-Calderón y cols., 2020] | [Faqi-Ahmed y Omar, 2017] |
|--|---------------------------------|--|--|---------------------------|
| Lubricante | | SAE 10W40 utilizado en vehículos de carga pesada | Aceite sintético utilizado en un motor de combustión interna de un automóvil particular durante 10,000 km. | SAE 15W40 |
| Procedimiento de regeneración/re-refinación | | Tecnología de regeneración ecológica desarrollada internamente | Regeneración por extracción con diferentes disolventes | Re-refinación |
| Lubricante nuevo | Viscosidad | - | 110.71 cSt a 30 °C | 193.5 cSt |
| | Coefficiente de fricción | $\mu \approx 0.08$ | - | - |
| | Desgaste | Ligero | - | - |
| Lubricante usado | Viscosidad | - | 166.68 cSt a 30 °C | - |
| | Coefficiente de fricción | $\mu \approx 0.11$ | - | - |
| | Desgaste | Severo | - | - |
| Lubricante regenerado/re-refinado | Viscosidad | - | Diferentes comportamientos dependiendo del disolvente. | 169.7 cSt |
| | Coefficiente de fricción | $\mu \approx 0.095$ | - | - |
| | Desgaste | Regular | - | - |

Fuente: Elaboración propia.

3. Discusión

En este trabajo se ha resaltado la importancia de los lubricantes automotrices para el funcionamiento eficiente de los vehículos al reducir la fricción y el desgaste de las partes móviles, lo que garantiza un rendimiento óptimo y prolonga la vida útil de los componentes del motor. No obstante, a pesar de sus beneficios, los lubricantes convencionales (derivados del petróleo) tienen un impacto significativo en el medio ambiente. La producción y eliminación inadecuada de aceites usados pueden contaminar el suelo y el agua, subrayando la necesidad de métodos sostenibles de gestión de lubricantes.

Los procesos de regeneración y re-refinación de aceites usados son estrategias para restaurar en cierta medida las propiedades de los lubricantes. Estos procesos no solo son una opción económica, sino también una práctica sostenible que contribuye a la reducción de residuos peligrosos y la conservación de los recursos naturales, promoviendo una industria automotriz más eficiente y ecológica.

Sin embargo, evaluar el efecto de la regeneración o re-refinación de los aceites usados en las propiedades reológicas y tribológicas es de vital importancia ya que se debe asegurar que el aceite regenerado o re-refinado mantenga o pueda ofrecer una protección comparable a los aceites nuevos, y con ello certificar que son una alternativa viable y efectiva, contribuyendo a la sostenibilidad, eficiencia y reducción de costos en la industria de los lubricantes.

En términos generales, la información presentada en la Tabla 4 revela que los lubricantes regenerados experimentan modificaciones en sus propiedades reológicas, como la viscosidad, cuando se comparan con los lubricantes usados y nuevos. Estos cambios reflejan una alteración en su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas. Además, los lubricantes regenerados mejoran las propiedades tribológicas en relación con los lubricantes usados, ya que reducen la fricción y el desgaste de las superficies en contacto. Sin embargo, es importante destacar que, aunque se observan mejoras, el rendimiento general de los lubricantes regenerados no alcanza el mismo nivel que el de los lubricantes nuevos. En cuanto al lubricante que ha sido re-refinado, se observó una disminución en su viscosidad en comparación con el lubricante nuevo. Este cambio podría influir en la

capacidad del lubricante para formar una película protectora adecuada bajo condiciones de operación extremas. No obstante, es relevante mencionar que no se evaluaron las propiedades tribológicas del lubricante re-refinado, por lo que se desconoce su desempeño en términos de reducción de fricción y desgaste.

Para obtener una comprensión completa del impacto de la regeneración y re-refinación en los lubricantes, sería necesario realizar pruebas adicionales que evalúen tanto las propiedades reológicas como las tribológicas. Estos estudios contribuirían a optimizar los procesos de tratamiento y garantizar que los lubricantes recuperados ofrezcan un rendimiento fiable y comparable al de los lubricantes nuevos.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha destacado la importancia crucial de los lubricantes automotrices para el funcionamiento eficiente y la durabilidad de los vehículos, así como sus significativas implicaciones medioambientales. En resumen los principales puntos son:

- Cada componente móvil de un vehículo, en especial el motor, necesita lubricación para facilitar el movimiento y prolongar la vida útil de las piezas. Es fundamental utilizar el lubricante adecuado y realizar los cambios necesarios según las recomendaciones de los fabricantes para asegurar el correcto funcionamiento del vehículo.
- Los lubricantes convencionales derivados del petróleo presentan un significativo impacto ambiental debido a la producción y eliminación inadecuada de aceites usados.
- Para enfrentar este desafío, se han identificado los procesos de regeneración y re-refinación de aceites usados como estrategias viables. Aunque actualmente presentan algunas limitaciones, la continua innovación en estas tecnologías fomentará un crecimiento sostenible en la industria de los lubricantes.
- Un aspecto crucial es evaluar el impacto de los procesos de recuperación de lubricantes en sus propiedades reológicas y tribológicas. Esto es esencial

para garantizar que los lubricantes recuperados ofrezcan un rendimiento comparable al de los aceites nuevos, cumplan con las normativas de calidad y rendimiento establecidas por entidades como *SAE* y *API*, y aseguren la protección y eficiencia de los motores.

- Las políticas actuales, como la Estrategia Nacional de Mejora Regulatoria en México, buscan mejorar la gestión y regeneración de lubricantes para proteger el medio ambiente y promover la economía circular.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento al Tecnológico Nacional de México, en particular al Instituto Tecnológico Superior de Irapuato y al Instituto Tecnológico de Celaya, por su invaluable apoyo en el marco del proyecto SIRA-PYR-2024-20859.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] API. (2020). Oil categories. <https://www.api.org/products-and-services/engine-oil/eolcs-categories-and-classifications/oil-categories>.
- [2] Caines, A. J., Haycock, R. F., y Hillier, J. E. (2004). Automotive lubricants reference book (Vol. 354). John Wiley & Sons.
- [3] Faqi-Ahmed, B. M., y Omar, K. A. (2017). Comparative Study between Physical Properties of Virgin Oil and Re-Refining Oil. *Open Access Library Journal*, 4(2), 1-6.
- [4] Hernández-Sierra, M.T., Moreno, K. J. y Báez, J.E. (2022). Efecto De La Naturaleza Química De Los Aceites Vegetales Como Lubricantes Y El Rol Principal Del Aceite De Ricino (Effect Of The Chemical Nature Of Vegetable Oils As Lubricants And The Major Role Of Castor Oil). *Pistas Educativas*, 44(143).
- [5] Holmberg, K., Andersson, P., y Erdemir, A. (2012). Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology international*, 47, 221-234.

- [6] Klenert, D., García-Gutiérrez, P., Tonini, D., Saveyn, H., y Marschinski, R. (2024). The economics of waste oil recycling in the EU. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 1-22.
- [7] Ludema, K.C. (1984). Mechanical Friction and Lubrication in Automobiles. En: Hilliard, J.C., Springer, G.S. (eds) *Fuel Economy*. Springer, Boston, MA.
- [8] Miner, P., Smith, B. M., Jani, A., McNeill, G., y Gathorne-Hardy, A. (2024). Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment. *Journal of Transport Geography*, 115, 103817.
- [9] Placek, M. (2024). Worldwide motor vehicle production 2000-2023. Statista. <https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/#:~:text=In%202023%2C%20some%2094%20million%20motor%20vehicles%20were,the%20largest%20producers%20of%20cars%20and%20commercial%20vehicles>.
- [10] Romero, C. A., Correa, P., Ariza Echeverri, E. A., y Vergara, D. (2024). Strategies for reducing automobile fuel consumption. *Applied Sciences*, 14(2), 910.
- [11] Sánchez-Alvarracín, C., Criollo-Bravo, J., Albuja-Arias, D., García-Ávila, F., y Pelaez-Samaniego, M. R. (2021). Characterization of used lubricant oil in a Latin-American medium-size city and analysis of options for its regeneration. *Recycling*, 6(1), 10.
- [12] Vale-Capdevila, R. M., Pérez-Silva, R. M., y Ramírez-Gotario, M. (2016). Valoración del impacto ambiental en una productora de aceites y grasas lubricantes. *Revista Cubana de Química*, 28(2), 736-750.
- [13] Velasco-Calderon, J. C., Garcia-Figueroa, A. A., Cervantes, J. L. L., y Gracia-Fadrique, J. (2020). Regeneration of used lubricating oil by solvent extraction and phase diagram analysis. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, 100010.
- [14] Wang, X. L., Zhang, G. N., Zhang, J. Y., Yin, Y. L., y Xu, Y. (2013). Failure analysis and regeneration performances evaluation on engine lubricating oil. *Physics Procedia*, 50, 473-479.