

La importancia de la lubricidad del combustible en los motores diésel: Garantizar la durabilidad y el rendimiento

En los motores diésel, la calidad del combustible va más allá de la potencia y el rendimiento; es fundamental para mantener la durabilidad de los componentes del motor. Un factor clave en este sentido es la lubricidad del combustible: la capacidad del combustible para reducir la fricción y evitar el desgaste de piezas críticas como los inyectores y las bombas de combustible. Una lubricidad adecuada es esencial para evitar un desgaste excesivo. La transición al diésel con contenido ultra bajo en azufre (ULSD), impulsada por estrictas normativas medioambientales, ha dificultado el mantenimiento de una lubricidad adecuada. Históricamente, el azufre del gasóleo proporcionaba una lubricación natural, pero a medida que ha disminuido el contenido de azufre, también lo ha hecho la lubricidad de estos combustibles. Este cambio subraya la necesidad de soluciones eficaces para mejorar y medir la lubricidad del gasóleo con un contenido bajo en azufre.



En este artículo, exploramos los principios científicos que subyacen a la lubricidad del combustible, examinando cómo influye en el rendimiento del motor y la durabilidad de los componentes. Repasaremos los métodos de ensayo utilizados para evaluar la lubricidad del combustible, incluyendo el equipo para determinación de lubricidad y rozamiento (High-Frequency Reciprocating Rig, HFRR) y normas de la industria como la ISO 12156 y la ASTM D6079. Además, analizaremos el papel de los aditivos en la mejora del rendimiento del combustible y el restablecimiento de la lubricidad en el ULSD. Al examinar estos aspectos, pretendemos proporcionar una comprensión global de cómo abordar los retos de la lubricidad y garantizar la protección y la eficiencia del motor.

Lubricidad del combustible y su función en los motores diésel

La lubricidad del combustible se refiere a su capacidad para evitar el desgaste de los componentes del motor con los que entra en contacto, como los inyectores y las bombas de combustible. Estos componentes son esenciales para el funcionamiento de un motor diésel, ya que garantizan el suministro preciso de combustible a las cámaras de combustión. Cuando estas piezas no están adecuadamente lubricadas, se pueden desgastar prematuramente, lo que conlleva un aumento de los costes de mantenimiento, una reducción del rendimiento del motor y, en última instancia, una menor vida útil del motor.



Históricamente, los combustibles diésel contenían altos niveles de azufre, que proporcionaban la lubricación necesaria para estos componentes críticos. La presencia de azufre actuaba como lubricante natural, ayudando a reducir la fricción y el desgaste. Sin embargo, el impulso para reducir el contenido de azufre en el combustible diésel por razones medioambientales ha introducido retos significativos: los combustibles diésel bajos en azufre carecen de la lubricidad natural de sus predecesores, dejando los componentes del motor más vulnerables al desgaste. Los estudios han demostrado que esta reducción del contenido de azufre se correlaciona con un mayor desgaste de los inyectores y las bombas de combustible debido a una lubricación inadecuada [1].

Las implicaciones mecánicas de una reducción de la lubricidad

Las consecuencias mecánicas de la reducción de la lubricidad son significativas. Sin las propiedades lubricantes naturales que proporciona el azufre, los componentes de los motores diésel son más susceptibles a problemas como el rozamiento y el micropitting. El rozamiento se refiere a la ruptura de las películas lubricantes, lo que aumenta la fricción y el desgaste, mientras que el micropitting implica la formación de pequeñas picaduras o hendiduras en las superficies metálicas debido a la tensión repetida y a una lubricación inadecuada [2]. Ambos fenómenos pueden acelerar la degradación de las piezas del motor y afectar negativamente al rendimiento general.

Para resolver estos problemas de lubricidad que plantea el gasóleo con bajo contenido en azufre, se han estudiado diversos aditivos. Las investigaciones indican que los ésteres metílicos de ácidos grasos, derivados de biocombustibles, pueden servir como aditivos lubricantes eficaces. Por ejemplo, Liu et al. (2019) demostraron que la adición de ésteres metílicos de ácidos grasos al combustible diésel ultrabajo en azufre mejoraba significativamente sus propiedades lubricantes, reduciendo el desgaste y la fricción en los componentes del motor [3]. Estos aditivos actúan formando una capa protectora sobre las superficies metálicas, similar a la función del azufre en los combustibles diésel tradicionales. La introducción de estos aditivos subraya la necesidad de realizar pruebas normalizadas para garantizar que los combustibles diésel cumplen los requisitos mínimos de lubricidad. El equipo para determinación de lubricidad y rozamiento (HFRR) es una de esas herramientas utilizadas para evaluar y mantener los estándares de lubricidad de los combustibles, proporcionando una medida fiable de las propiedades lubricantes de los combustibles diésel. La prueba HFRR es fundamental para evaluar cómo las diferentes formulaciones, incluidas las mezclas de biodiésel, afectan a la lubricidad del combustible y al rendimiento del motor [2].

El paso al gasóleo con bajo contenido en azufre y sus consecuencias

En respuesta a la creciente preocupación por el medio ambiente, se promulgaron normas para reducir drásticamente el contenido de azufre en los combustibles diésel. Esto llevó a la adopción generalizada del gasóleo de ultra bajo contenido en azufre (ULSD), que contiene una cantidad significativamente menor de azufre que los gasóleos tradicionales. Aunque el ULSD ha sido eficaz en la reducción de emisiones nocivas como los óxidos de azufre (SOX), ha introducido una nueva serie de retos relacionados con la lubricidad del combustible.





Impacto en la lubricidad del combustible

Históricamente, el azufre del gasóleo proporcionaba propiedades lubricantes esenciales que protegían los componentes críticos del motor. La reducción del contenido de azufre con la llegada del ULSD provocó una disminución significativa de la lubricidad natural de los combustibles diésel. Este cambio tuvo consecuencias inmediatas para la industria de los motores diésel. Surgieron informes sobre un mayor desgaste de los componentes del sistema de combustible, incluidos fallos más frecuentes de las bombas de combustible y averías en los inyectores [1]. La disminución de la lubricidad provocó una mayor fricción entre las piezas móviles, acelerando el desgaste y acortando potencialmente la vida útil de estos componentes [2].



Para ilustrar la urgencia de abordar los retos de la lubricidad, consideremos un escenario en el que una flota de camiones de reparto experimenta un tiempo de inactividad inesperado debido a fallos en la bomba de combustible. Esta situación es cada vez más común para los operadores que se enfrentan a costes de reparación cada vez mayores, lo que pone de relieve la necesidad crítica de soluciones de lubricidad eficaces para mantener la eficiencia de las operaciones.

Respuesta de la industria y aditivos

Para mitigar los efectos negativos de la reducción de la lubricidad, la industria buscó soluciones en forma de aditivos de lubricidad. Estos aditivos se diseñaron para reproducir las propiedades lubricantes que antes proporcionaba el azufre. La investigación sobre diversos aditivos, incluidos el biodiésel y los lubricantes sintéticos, demostró su eficacia para mejorar la lubricidad del ULSD. Por ejemplo, los estudios han demostrado que las mezclas de biodiésel pueden mejorar significativamente las características lubricantes de los combustibles ULSD [3]. Estos aditivos ayudan a formar una capa protectora sobre las superficies metálicas, reduciendo la fricción y el desgaste.

Necesidad de métodos de ensayo fiables

La introducción de aditivos de lubricidad puso de manifiesto la necesidad de disponer de métodos de ensayo fiables para garantizar que los combustibles diésel cumplen las normas de lubricidad exigidas. El equipo para determinación de lubricidad y rozamiento (HFRR) se ha convertido en una herramienta crucial en este sentido. Permite la medición coherente de la lubricidad del combustible, garantizando que todos los combustibles diésel, independientemente de su contenido de azufre o aditivos, proporcionen una protección adecuada a los componentes del motor. Al adherirse a normas establecidas como ISO 12156, ASTM D6079 y ASTM D7688, la industria puede gestionar mejor las compensaciones entre los beneficios medioambientales y el rendimiento del motor [1].





Comparación con otros combustibles

La comprensión de los retos que plantea la lubricidad del combustible en los motores diésel resulta más clara si se compara con otros tipos de combustibles. Los combustibles diésel, en particular el diésel ultra bajo en azufre (ULSD), se enfrentan a retos de lubricación únicos debido a la dependencia histórica del azufre para la lubricación natural. En cambio, otros combustibles como la gasolina y opciones alternativas como el biodiésel y el etanol tienen propiedades y requisitos diferentes. Esta comparación ayuda a comprender por qué los combustibles diésel requieren soluciones específicas para mantener la lubricidad y destaca cómo los combustibles alternativos abordan o sortean estos retos de diversas maneras.

Diesel vs. Gasolina

Requisitos de lubricidad: Los motores diésel suelen requerir combustibles de mayor lubricidad que los motores de gasolina, debido a las altas presiones y temperaturas del sistema de combustible diésel. Los motores de gasolina, por el contrario, a menudo dependen de diferentes estrategias de lubricación dentro de sus sistemas, y la lubricidad de la gasolina es menos crítica en comparación con el diésel.

Composición del combustible: A diferencia de los combustibles diésel, que históricamente dependían del azufre para la lubricación, la gasolina tiene propiedades químicas diferentes y no se enfrenta a los mismos problemas con la reducción de la lubricidad natural. Esto se debe en parte a que los motores de gasolina suelen funcionar a presiones y temperaturas más bajas.

Combustibles alternativos

- **Biodiésel:** El biodiésel se utiliza a menudo para mejorar la lubricidad del diésel ultra bajo en azufre (ULSD). Puede proporcionar propiedades lubricantes naturales similares a las que se perdieron cuando se eliminó el azufre de los combustibles diésel. La investigación ha demostrado que las mezclas de biodiésel pueden restaurar eficazmente la lubricidad y mejorar el rendimiento del motor [1][3].

- **Etanol:** El etanol, utilizado habitualmente en las mezclas de gasolina, no afecta significativamente a la lubricidad del mismo modo que el biodiésel. Sin embargo, el etanol puede influir en los componentes del sistema de combustible debido a sus diferentes características químicas y puede afectar potencialmente al rendimiento del motor si no se gestiona adecuadamente.

- **Hidrógeno:** El hidrógeno es un combustible alternativo prometedor sin propiedades lubricantes porque no es un combustible líquido. Su uso en pilas de combustible implica una tecnología diferente y no afecta directamente a la lubricidad en el sentido tradicional. Sin embargo, su introducción en el mercado de los combustibles exigirá nuevas estrategias para el diseño de los motores y la gestión del sistema de combustible.





Desarrollo de normas y pruebas de lubricidad de los combustibles

Los rápidos cambios en la composición del combustible y los retos resultantes subrayaron la necesidad de realizar pruebas normalizadas para garantizar que todos los combustibles diésel cumplieran un nivel mínimo de lubricidad. Aquí es donde entró en juego el equipo para determinación de lubricidad y rozamiento (HFRR). El HFRR es una herramienta esencial para el desarrollo y la aplicación de las normas de lubricidad de los combustibles en todo el mundo.

El HFRR de PCS Instruments está a la vanguardia de este esfuerzo, desempeñando un papel fundamental en el establecimiento y mantenimiento de normas internacionales clave como ISO 12156, ASTM D6079 y ASTM D7688. Estas normas garantizan que los combustibles diésel proporcionen una lubricación suficiente para proteger los componentes del motor, independientemente de su contenido en azufre. Al cumplir estas normas, los productores de combustible pueden garantizar que sus productos no contribuirán al desgaste prematuro de los motores diésel, salvaguardando así la durabilidad y fiabilidad de estas máquinas.

Tras la introducción del HFRR, merece la pena destacar una investigación que valida aún más la eficacia de este método de ensayo. Un estudio que comparaba las características lubricantes de varias formulaciones de combustible diésel parafínico -incluidas las mezclas de biodiésel y los combustibles con mejoradores de lubricidad- demostró que la prueba HFRR es más restrictiva y severa que la prueba SL-BOCLE. En particular, el estudio reveló que ninguna muestra de diésel parafínico que obtuviera buenos resultados en la prueba HFRR obtuvo malos resultados en la prueba SL-BOCLE, lo que confirma la fiabilidad de la prueba HFRR. Esta investigación subraya que la prueba HFRR por sí sola es suficiente para certificar la lubricidad de los combustibles diésel, eliminando la necesidad de pruebas adicionales como la SL-BOCLE. Esto refuerza el papel fundamental del HFRR a la hora de garantizar que los combustibles diésel modernos cumplen las normas de lubricidad necesarias para proteger los componentes del motor [1].

El papel del ZDDP en la lucha contra el desgaste y el impacto medioambiental

A medida que la lubricidad del gasóleo disminuye con la reducción del azufre, los componentes del motor se vuelven más propensos al desgaste y a la formación de cicatrices, especialmente entre las piezas metálicas que dependen de la lubricación del combustible. El ZDDP (Dialquil Ditiófosfato de Zinc), un aditivo antidesgaste presente en los aceites de motor, es conocido desde hace tiempo por su capacidad para proteger las superficies metálicas formando una película protectora que reduce la fricción. El rozamiento y el micropitting son dos fenómenos de desgaste específicos que pueden producirse cuando la lubricidad es insuficiente:

- El rozamiento se refiere a la deformación de las superficies metálicas cuando se rompe la película lubricante entre ellas. La lubricidad reducida en combustibles como el ULSD puede provocar un mayor contacto entre metales, intensificando la fricción y acelerando el desgaste.

- El micropitting es una forma de desgaste superficial que da lugar a la formación de pequeños cráteres o picaduras en las superficies metálicas debido a la carga cíclica. Esta forma de daño debilita la integridad de los componentes y puede provocar un fallo prematuro. Una lubricación insuficiente agrava el micropitting, provocando una degradación a largo plazo.

El ZDDP desempeña un papel crucial en la prevención tanto del rozamiento como del micropitting al mejorar la película protectora de las piezas del motor. Sin embargo, equilibrar las ventajas del ZDDP con la normativa medioambiental sigue siendo un reto, ya que el ZDDP puede dañar los catalizadores y aumentar las emisiones.

Consideraciones medioambientales

**Soluciones
para quienes
mueven el mundo**

c/ Penedés, 46
08820 El Prat de Llobregat
Barcelona · Tel. +34 934 787 161
barcelona@instru.es

c/ Isabel Colbrand, 10
Nave 89 · 28050 Madrid
Tel. +34 913 588 879
madrid@instru.es



www.instru.es



Aunque el ZDDP es eficaz en la lucha contra el desgaste, ha sido objeto de críticas debido a su impacto medioambiental, especialmente por su efecto en los sistemas de control de emisiones. Las normativas actuales han limitado la cantidad de ZDDP que puede utilizarse en los aceites de motor, por lo que resulta crucial encontrar alternativas o mejorar las fórmulas de los aditivos que cumplan tanto las normas medioambientales como las de rendimiento. Los aditivos para combustibles, como el biodiésel, se consideran cada vez más soluciones ecológicas al problema de la lubricidad. Los estudios han demostrado que las mezclas de biodiésel pueden mejorar la lubricidad del ULSD sin los efectos secundarios negativos para el medio ambiente del ZDDP. Estos bioaditivos ofrecen una alternativa renovable y de bajas emisiones que mejora la lubricidad y reduce el desgaste de los motores diésel [1][2][3].



El papel fundamental de la lubricidad en los motores diésel modernos

A medida que avanza la tecnología diésel, la importancia crítica de mantener la lubricidad del combustible es cada vez más evidente. Los motores diésel modernos, diseñados con tolerancias más estrictas, son más sensibles que nunca a la calidad del combustible, por lo que una lubricidad adecuada es esencial para un rendimiento y una durabilidad óptimos. La transición al diésel con contenido ultrabajo en azufre (ULSD) ha transformado el panorama de la lubricación; la eliminación del azufre -históricamente un lubricante natural- ha provocado un mayor desgaste de los componentes clave. Los informes sobre el aumento de averías en bombas de combustible e inyectores ponen de manifiesto la urgente necesidad de soluciones de lubricación eficaces, ya que los estudios indican que la reducción de azufre se correlaciona con el aumento de las tasas de desgaste en estas piezas críticas [1][2].

En respuesta a estos retos, la industria está investigando activamente aditivos innovadores, en particular los derivados del biodiésel. La investigación ha demostrado que los ésteres metílicos de ácidos grasos pueden mejorar la lubricidad del ULSD formando películas protectoras sobre las superficies metálicas, reduciendo potencialmente el desgaste [3]. Aunque las mezclas de biodiésel resultan prometedoras para mejorar la lubricidad, la variabilidad en la calidad del biocombustible y la escalabilidad de la producción subrayan la necesidad de un mayor estudio y normalización para garantizar un rendimiento uniforme en todas las formulaciones.

Para respaldar estos avances, es más importante que nunca contar con normas de ensayo rigurosas. El equipo para determinación de lubricidad y rozamiento (HFRR, por sus siglas en inglés) desempeña un papel fundamental en este panorama, ya que proporciona mediciones fiables de la lubricidad que permiten a los productores de combustible perfeccionar las fórmulas para satisfacer tanto las exigencias de rendimiento como las normativas. El HFRR ha desempeñado un papel decisivo en el establecimiento de normas internacionales clave para las pruebas de lubricidad, garantizando que los combustibles diésel proporcionen una protección adecuada a los componentes del motor [1].

De cara al futuro, la atención a la lubricidad seguirá siendo vital a medida que evolucione la industria del gasóleo. La investigación continua de nuevos aditivos y formulaciones será esencial para afrontar el doble reto de las normativas medioambientales y la protección de los motores. Con organizaciones como PCS Instruments a la vanguardia de los ensayos y la normalización, el futuro de los motores diésel promete integrar la innovación y la sostenibilidad, manteniendo al mismo tiempo un alto rendimiento.

**Soluciones
para quienes
mueven el mundo**

c/ Penedés, 46
08820 El Prat de Llobregat
Barcelona · Tel. +34 934 787 161
barcelona@instru.es

c/ Isabel Colbrand, 10
Nave 89 · 28050 Madrid
Tel. +34 913 588 879
madrid@instru.es



www.instru.es



Conclusiones finales

A medida que nos adentramos en las complejidades de la tecnología diésel moderna, la importancia de la lubricidad del combustible se hace cada vez más evidente. La transición al diésel ultra bajo en azufre (ULSD) ha planteado importantes retos, pero también ha impulsado la innovación en el sector. Si seguimos explorando aditivos y biocombustibles eficaces, podremos restaurar la lubricidad y garantizar la durabilidad de los motores diésel. Las pruebas rigurosas y el cumplimiento de las normas establecidas, como las que mantiene PCS Instruments, serán esenciales en este empeño.

De cara al futuro, la tecnología diésel es prometedora. Con la investigación y la colaboración continuas, podemos desarrollar soluciones que equilibren el rendimiento con la sostenibilidad medioambiental. A medida que la industria se adapta a las nuevas normativas y expectativas de los consumidores, el compromiso de mejorar la lubricidad del combustible no sólo contribuirá a la durabilidad de los motores diésel, sino también a un paisaje automovilístico más sostenible.

Referencias

1. Barbour, R. H., Rickeard, D. J., & Elliott, N. G. (2000). Understanding Diesel Lubricity. SAE Transactions, 109, 1556–1566. <http://www.jstor.org/stable/44745957>
2. Energy Fuels. (2020). The lubricant characteristics of different paraffinic diesel fuel formulations. Energy & Fuels, 34(3), 2654–2664. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03169>
3. Liu, X., Wang, L., & Li, M. (2019). Evaluation of fatty acid methyl esters as lubricating additives in ultralow-sulfur diesel fuel. Fuel, 235, 1327-1335. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.009>



Artículo traducido de la web de PCS Instruments por instru

