



Impacto de las partículas y la calidad del combustible en la vida de los motores a diésel y el medio ambiente – Parte 2



“Somos lo que comemos”

Ludwig Feuerbach (Enseñanza de la alimentación)

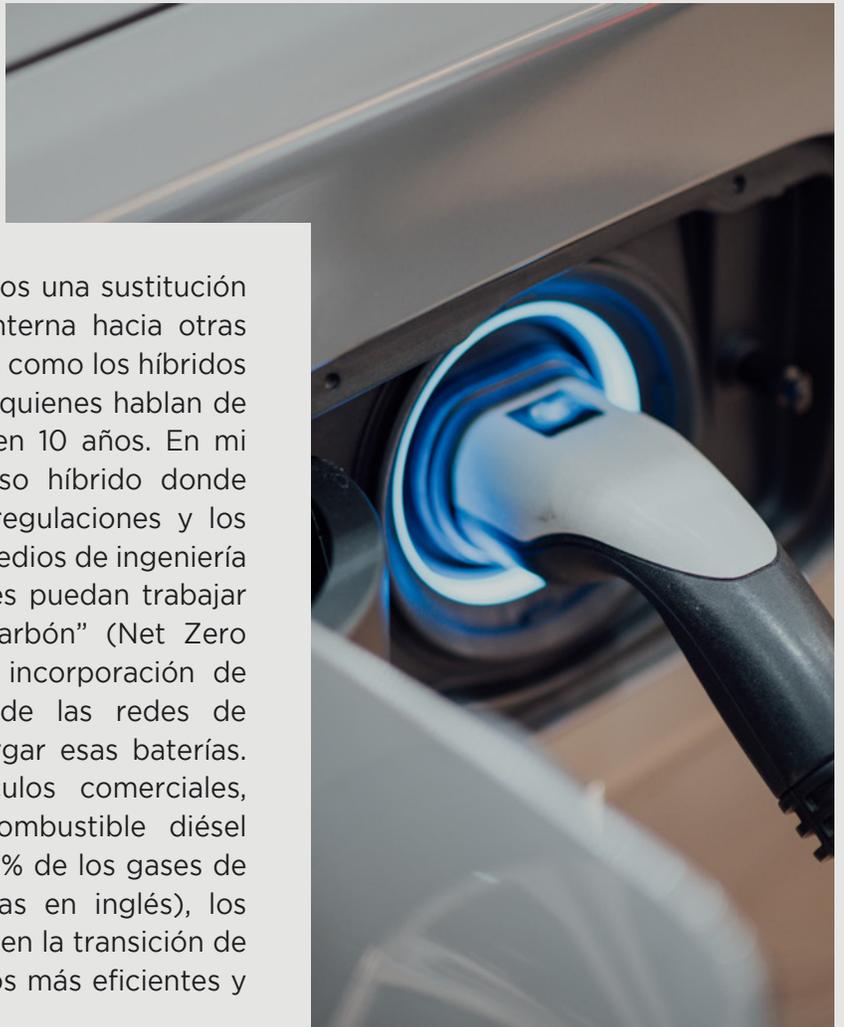
Frase que con frecuencia escuchamos de los expertos en nutrición. En el caso del motor de combustión interna a diésel, este dicho aplica de manera perfecta. La vida del motor de combustión interna a diésel depende de lo que come. La calidad y condiciones del combustible determinan de varias maneras su desempeño y vida útil, impactando de manera muy severa el costo de propiedad, los gases efecto invernadero, las partículas de carbón y la huella de carbón que dejamos en el medio ambiente.

La primera parte de este artículo se enfocó en identificar la importancia de la gestión del combustible en la vida del motor de combustión interna a diésel. El impacto que se logra al mantener el diésel limpio, seco y sin contaminación por otros combustibles o por biomasa. En esta segunda parte abordaremos la manera en que los fabricantes de los motores enfrentan las restricciones impuestas por los organismos internacionales para disminuir el consumo de combustible y el impacto al medio ambiente mediante los sistemas de combustión y post tratamiento del motor; la manera en que los administradores de las flotas diseñan e implementan estrategias avanzadas de mantenimiento del motor; y por último, abordaremos la calidad del combustible desde las limitaciones impuestas por las políticas de cada país, sus capacidades tecnológicas y económicas para la disponibilidad, propiedades físicas y químicas del combustible diésel como elementos clave en el desempeño de los motores y su impacto al medio ambiente.

Diseño de un motor menos contaminante

Contrario a lo que muchos creen, veremos una sustitución lenta de los motores de combustión interna hacia otras fuentes de energía menos contaminantes como los híbridos y eléctricos. Constantemente escucho a quienes hablan de la salida inminente del motor a diésel en 10 años. En mi opinión, esta transición será un proceso híbrido donde jugarán un papel muy importante las regulaciones y los fabricantes de motores, que usarán los medios de ingeniería y tecnología para lograr que los motores puedan trabajar cumpliendo con “cero emisiones de carbón” (Net Zero Carbon Emissions), y el avance en la incorporación de motores eléctricos y el crecimiento de las redes de abastecimiento de electricidad para cargar esas baterías. Considerando que 97% de los vehículos comerciales, locomotoras y barcos operan con combustible diésel actualmente y que esto contribuye al 24% de los gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés), los esfuerzos a nivel global están enfocados en la transición de los motores antiguos por motores nuevos más eficientes y menos contaminantes.

Esta evolución comenzó desde los años 70 y se ha acelerado en los últimos años. Los cambios han sido liderados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y la Comisión Europea (CE). Estas organizaciones han establecido los criterios de emisiones y motivado que los fabricantes de motores desarrollen tecnologías que cumplan con esos límites más exigentes cada vez para disminuir la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx), partículas de materia (PM), monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO₂). Para cumplir con los requerimientos de estos organismos,



los fabricantes de motores han modificado sus diseños para incorporar nuevos sistemas de recirculación de gases del escape (EGR, por sus siglas en inglés), filtros de partículas (DPF, por sus siglas en inglés), filtros catalíticos selectivos (SCR, por sus siglas en inglés) y otras tecnologías que son incorporadas en los motores de últimas generaciones. Las restricciones y controles para las emisiones se han endurecido, y en el 2025, con la llegada de la Euro 7 con una reducción del 60% en dióxido de nitrógeno (NO₂), 90% de las partículas de materia y eliminar el amoníaco que se produce en los sistemas catalíticos selectivos (que antes era tolerado), muchos fabricantes de motores están enfocándose en diseñar alternativas eléctricas o híbridas, pensando que los motores a diésel ya no lograrán cumplir esos límites, mientras que otros están trabajando en innovadores diseños para conseguir cumplir con ese extraordinario requerimiento.

Otro factor que ha motivado cambios en la industria automotriz es el objetivo de consumir menos combustible. Es evidente que, mientras menos combustible se consume, se generan menos partículas y gases que afectan el aire que respiramos, a la vez que se disminuye el costo principal de operación de una flota. Para mejorar la eficiencia, se han diseñado mejores sistemas de inyección de combustible incluyendo bombas electrónicas con sistemas de medición de alta precisión y presión, reemplazando los inyectores mecánicos antiguos por inyectores controlados electrónicamente que aplican el combustible pulverizado de manera perfecta en el cilindro para que sea quemado más eficientemente. Estos sistemas transformaron el inyector mecánico en unidades inyectoras hidráulicas electrónicas (HEUI, por sus siglas en inglés) y en inyectores de alta presión que operan en riel común (HPCR, por

sus siglas en inglés). Los HPCR pueden operar a presiones de hasta 35,000 psi (2,413 bar) con lo que se consigue una alta eficiencia de combustión. Estos sistemas permiten que los motores modernos logren pasar los exigentes requerimientos de EPA o Euro 4, 5 y 6. Estos sistemas de inyección tienen un objetivo muy específico: mejorar la precisión en el tiempo de inyección y la cantidad de combustible. Los sistemas HEUI pueden inyectar combustible 2 veces en el tiempo de ignición, mientras que los HPCR de riel común inyectan hasta 5 veces en el mismo ciclo de combustión. Esta capacidad de inyección optimiza el quemado del combustible y disminuye a la vez la generación de compuestos de nitrógeno, proporcionando una operación más suave y mayor torque generado. La clave para que estos sistemas quemen el 100% del combustible es que la proporción de aire y combustible sea óptima y que el combustible diésel esté limpio y seco.





Es evidente que los nuevos motores se han rediseñado para no solo controlar mejor la emisión de partículas y gases de efecto invernadero, sino para consumir menos combustible. Esto suena bastante bien. Sin embargo, no significa que con la llegada de los motores nuevos de última generación los motores anteriores vayan a salir de operación (mucho menos en los países del tercer mundo). Esto es diferente en cada región del mundo y depende de las economías. Mientras que algunos países (o algunas empresas y flotas con estrategias sofisticadas) renuevan sus flotas de camiones cada 5 años, los camiones y equipos usados son comprados por flotas más pequeñas o son exportados a otros países.

Por cuestiones de economía, restricciones de comercio, disponibilidad de combustibles y otras razones políticas, en algunos países la disponibilidad de esas nuevas tecnologías es limitada (o nula). De poco sirve tener un motor equipado con la mejor tecnología si los combustibles o lubricantes disponibles en el mercado no satisfacen sus requerimientos o si no hay repuestos para mantener estos equipos funcionando en óptimas condiciones (como es el caso de los sistemas de post tratamiento). Los países en vías de desarrollo pueden operar sus motores de 20 a 25 años en promedio, haciendo que los beneficios de estos avances tecnológicos no tengan impacto. **Es por lo que la transición y sustitución hacia motores menos contaminantes y eficientes se hace muy lenta en el mundo, y en estas regiones, el costo de operación es mucho mayor, la eficiencia de combustible muy baja y la vida del motor es corta.** Lastimosamente, esto también afecta la generación de GHG y partículas que afectan la salud de la población.

Muchos tienen la esperanza puesta en los motores eléctricos los cuales vendrían a ser una solución casi mágica. Hay muchas implicaciones tecnológicas que hacen que esta solución no sea aún viable. No abundaremos en detalles, pero basta con mencionar que no tendríamos suficiente generación de energía eléctrica para cargar las baterías de los autos al final de un día de trabajo, mucho menos la infraestructura instalada para hacerlo. Esta es una de las soluciones que se avizoran más alejadas en el horizonte.

Adicional a las mejoras en la inyección del combustible y aire, se han incorporado a los motores sofisticados sistemas de post tratamiento de los gases de escape para controlar las partículas de materia y convertir los peligrosos compuestos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO) en N₂ y agua. La incorporación de sistemas EGR para bajar la temperatura de ignición y disminuir los NOx y PM, el uso de catalizadores de oxidación y filtros de partículas para retener el hollín (y posteriormente destruirlo en altas temperaturas al regenerar el DPF con el 7º inyector) y convertir el CO en compuestos no tóxicos, la adición de urea (AdBlue®) que se transforma en amoníaco (NH₃) y que, al mezclarse con los NOx y CO, reacciona para convertirse en nitrógeno molecular (N₂) y agua (H₂O). Las trazas de amoníaco son capturadas por el catalizador de amoníaco (ASC). Si este sistema se mantiene en condiciones adecuadas, las emisiones contaminantes al ambiente serán muy bajas (y menores cuando se implemente Euro 7 y las exigentes especificaciones de California (CARB 2024).

Estos sistemas han incrementado el costo de los motores (USD \$2,570 - \$3,997) y su complejidad, requiriendo ahora de otros insumos y mayores necesidades de mantenimiento (además de otros riesgos de seguridad). Adicionalmente, para que estos sistemas funcionen adecuadamente, deben operar con combustibles de bajo azufre (LSD, por sus siglas en inglés) y ultra bajo azufre (ULSD, por sus siglas en inglés) y lubricantes especialmente formulados para estos combustibles, de tal manera que los catalizadores y el filtro de partículas no sean afectados por algunos aditivos del aceite de motor.

Los expertos en el área ambiental saben que no podemos esperar a que el auto eléctrico sustituya al de combustión interna de petróleo refinado. Por ello, este problema complejo debe atacarse desde varios frentes para conseguir avances en todos los sentidos posibles.

Mejora en las prácticas de mantenimiento

El tercer eslabón para mejorar la vida del motor diésel está en las manos del dueño de las máquinas (de quien las mantiene y opera). Para que la tecnología pueda proporcionar ese desempeño de diseño y la eficiencia de combustible, la estrategia de mantenimiento del motor debe ser diseñada cuidadosamente, alineándose al mantenimiento de precisión.

Hemos dejado claro que las partículas en el combustible son un gran enemigo para el sistema de inyección, pero también lo son para el motor.



Por cada litro de diésel que se quema en el motor, se requieren 20 litros de aire, el cual debe estar libre de partículas. El mantenimiento del filtro de aire, las frecuencias de cambio y la gestión de las prácticas de servicio deben estar apegadas a las prácticas recomendadas. Si no controlamos el ingreso de partículas a la cámara de combustión, estas llegarán al aceite lubricante y lo contaminarán, destruyendo la película lubricante. Los espacios dinámicos entre pistón y cilindro son muy reducidos y están protegidos por una película lubricante muy delgada (por la temperatura de la combustión). Esta micrométrica película lubricante es muy importante para proteger esos componentes del motor. Si la película lubricante está limpia (sin partículas) en el encuentro entre el anillo y la camisa, el motor será protegido. Pero si una partícula sólida del tamaño de la película lubricante, que en este lugar es de 1Qm a 7 Qm (uno a siete micrones), queda atrapada entre el anillo y el cilindro, la película de aceite ya no puede proteger al ser reemplazada por la partícula sólida, provocando rayado del cilindro (desgaste abrasivo).

El aceite del motor también requiere estar limpio. Los niveles máximos de contaminación sólida deben ser ISO 18/16/13 (más bajo es mejor) conforme al estándar internacional ISO 4406. Para lograr estos niveles de limpieza, la estrategia de mantenimiento de la flota debe considerar prácticas muy cuidadosas de gestión de los filtros de aire, la manera en que se aplica el aceite y la limpieza del combustible. Las partículas sólidas que destruyen al motor encuentran su ingreso a través de los sistemas de admisión de aire (pre filtros, filtros primarios y secundarios) que deben ser gestionados de manera cuidadosa, evitando prácticas muy comunes como el soplado de los filtros usando aire comprimido y el lavado de filtros para tratar de recuperarlos cuando se han saturado. Los lubricantes nuevos deben ser filtrados antes de aplicarse al motor y los filtros de aceite del motor deben tener la eficiencia suficiente para lograr y sostener el nivel ISO 18/16/13. Existen opciones de filtración suplementaria como filtros de flujo parcial que se conectan a la línea de presión del aceite, ya sea mediante filtros de media sintética de alta eficiencia o sistemas centrífugos, que son capaces de retirar partículas de 1Qm e incluso hollín aglomerado. De esta manera, los niveles de limpieza pueden ser incluso mejores y ampliar la vida del aceite y de los filtros del motor. Ya hablamos de la importancia de la limpieza del combustible y del aire que evitará que las partículas de la combustión pasen a contaminar el aceite y a provocar desgaste abrasivo.



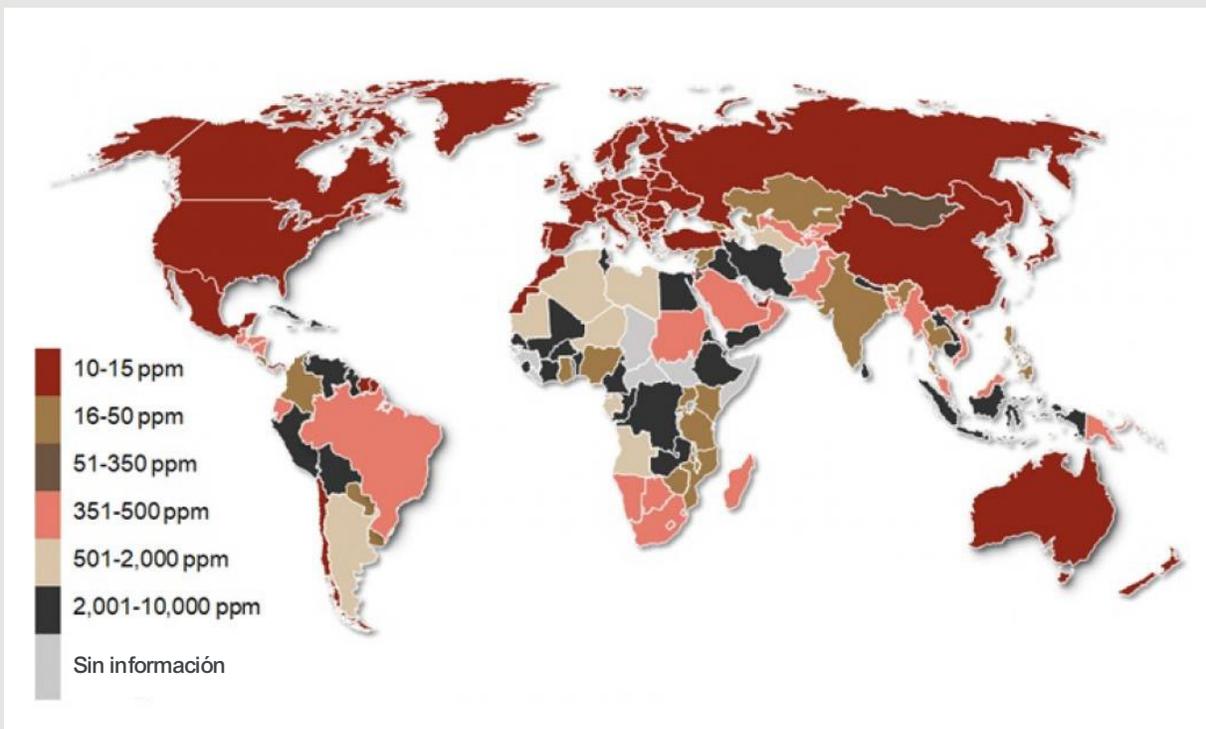
Una parte que es ignorada y a veces raya en la negligencia son las prácticas de almacenamiento, manejo y aplicación de lubricantes. La recepción del lubricante, su almacenamiento, métodos de transferencia y relleno deben alinearse al estándar internacional ICML 55.1 que define las prácticas mínimas recomendadas para la gestión del proceso de lubricación, incluyendo lineamientos muy específicos en cuanto a la filtración, purificación y control de contaminación. En la industria minera y de la construcción es conocido el programa de Caterpillar de 5 Estrellas que pone énfasis en este aspecto. Para lograr este programa de lubricación de excelencia, se debe iniciar con la educación de los técnicos y mecánicos para que sepan qué es la lubricación de excelencia, para qué se requiere y por qué debe ser implementada. Los gerentes de flota y directores o gerentes de mantenimiento deberán ser sensibilizados de estas prácticas y los recursos e instalaciones óptimas para conseguirlo.

Junto con la gestión de la lubricación de excelencia, debe ser implementado un programa de análisis de aceite con una visión proactiva. El análisis de aceite será esa herramienta que permitirá identificar si las medidas y estrategias implementadas están dando resultado y advertirnos de la presencia de partículas contaminantes, combustible, hollín, refrigerante y el final de la vida del lubricante. Adicionalmente, el análisis de lubricante podrá indicar la condición del motor y advertir situaciones anormales que pueden reflejarse en el lubricante (problemas del sistema de refrigeración, ajustes, calentamiento, fuga de gases, mal ensamble, sellos dañados, etc.). La gestión de la lubricación de excelencia encuentra su elemento de medición en el análisis de lubricante rutinario en laboratorio o en sitio. Pruebas soportadas por métodos científicos y personal capacitado que pueden ser ejecutadas en sitio, como la prueba de gota (una gota de aceite en un papel Whatman 4), pueden dar una alerta temprana de la contaminación del aceite de motor con combustible, refrigerante, partículas o incluso identificar un problema de combustión deficiente.

Diseñar y ejecutar una estrategia de lubricación de precisión en su flota dará como resultado la ampliación de la vida del lubricante (lo que contribuye a menor contaminación al medio ambiente y menores costos de operación) y una ampliación de la vida de los motores, que puede ser hasta de 5 veces.

Mejora en las propiedades químicas y de desempeño del combustible

Las nuevas generaciones de motores vienen acompañadas por nuevos requerimientos de combustible. Uno de los elementos más conocidos es el del contenido de azufre, por sus efectos nocivos al medio ambiente en forma de lluvia ácida. Adicionalmente, para el funcionamiento del motor, el azufre ocasiona problemas de corrosión interna al reaccionar con agua y oxígeno ante la presencia de las altas temperaturas como catalizador. Ahora se requieren combustibles LSD <50 ppm (50 mg/Kg) de azufre y las categorías ULSD <15 ppm (15 mg/Kg) de azufre.

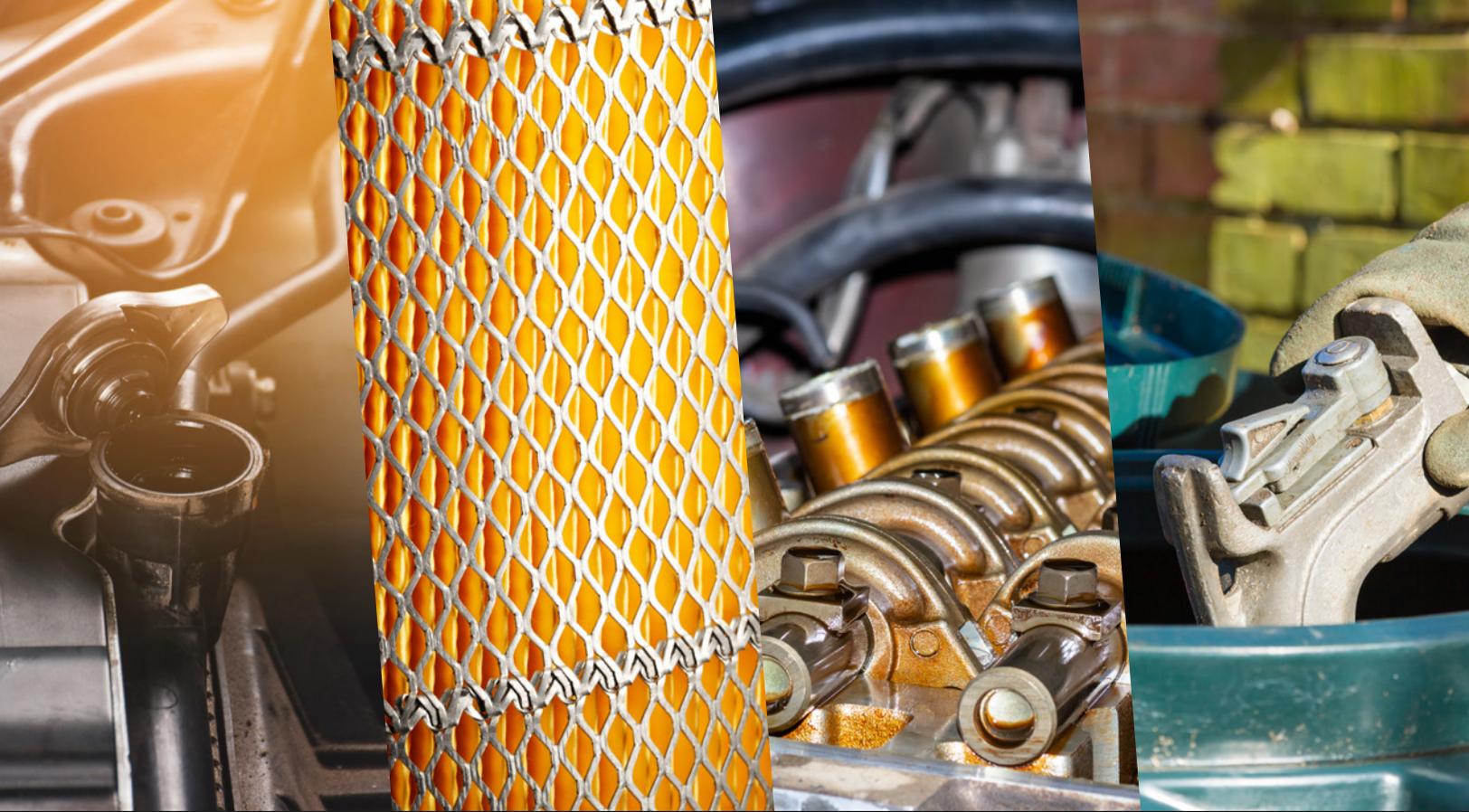


Cada país tiene sus propias políticas al respecto de la calidad del combustible que puede ser comercializado. Estas políticas son determinadas por las autoridades a los productores de combustibles e importadores, y por lo general atienden a factores políticos, económicos, subsidios, edad y tipo del parque vehicular. Es necesario aclarar que la calidad del combustible diésel no depende únicamente del contenido de azufre, sino de otros varios factores como el contenido de cenizas, corrosividad al cobre, lubricidad, número e índice de cetano, estabilidad a la oxidación, contenido de manganeso, etc. Todas estas características son obtenidas en el proceso de refinación y dependen de la procedencia del petróleo que se refina y del proceso utilizado en la refinería y su eficiencia. Para tener acceso a combustible de buena calidad y bajo contenido de azufre es necesario que los entes regulatorios del país (economía, energía y medio ambiente) establezcan esos requisitos y especificaciones. Ante esta situación, los países desarrollados tienen disponibilidad de combustibles ASTM D-975 Grado N° 2-D S15 con 15 ppm de azufre máximo (ULSD) y N° 2-D S500 con 500 ppm de azufre máximo (LSD) con códigos de contaminación ISO 4406 11/9/7 y menos de 500 ppm de agua, que permiten utilizar motores de alto desempeño que producen pocos contaminantes, consumen menos combustible, duran más tiempo, protegen la salud de las personas y contaminan menos el medio ambiente, mientras que los países en vías de desarrollo solo tienen acceso a combustibles ASTM D-975 Grado N° 2-D S5000 con 5,000 ppm de azufre máximo (ver mapa), con altos niveles de agua y combustible con ISO 22/20/18 (6,000 veces más sucio). El parque vehicular es muy viejo (o incluso son vehículos retirados de otros países) y las tecnologías que llegan con los

motores nuevos son las que pueden operar con este nivel de azufre en el combustible. Aunque tuvieran motores de alto desempeño, estos no podrían operar con ese combustible o los sistemas de post tratamiento se dañarían en poco tiempo (muchos de estos sistemas son deshabilitados por los propietarios). Este pareciera ser el elemento más complicado de resolver al depender de las políticas del país y la disponibilidad de combustibles mejores. Aquí es importante la educación en todos los niveles, desde los funcionarios, los políticos y los empresarios que piensan que al comprar combustible barato están logrando un ahorro. Nada más errado que esto. Un combustible barato y de baja calidad incrementa el consumo, destruye el sistema de inyección, contamina el aceite de motor, el motor se desgasta más, y por consiguiente dura menos tiempo, contamina más y requiere de más cambios de aceite y más combustible para operar. Pareciera que el remedio resulta peor que la enfermedad.

En conclusión, los problemas complejos requieren ser atendidos por estrategias escalonadas que aborden primero las oportunidades más sencillas y de bajo costo y establezcan acciones que aseguren que las metas se cumplan a largo plazo.

Ing. Gerardo Trujillo
- Marzo 15, 2022



Refrigerante

Aire

Lubricante

Combustible

MASTER
LUBE & TRAINING

Cómo incrementar la vida del motor a diésel controlando 4 elementos clave: Combustible, Lubricante, Aire y Refrigerante (CLAR)