

MOTORES

Desafío Tier 4: nuevas preguntas, nuevas respuestas

Jaime de León*

Adolfo Moya

Pilar Barreiro

LPFTAGRALIA. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid

*jaimedeleon.ortiz@gmail.com (www.lpftag.upm.es)

Este artículo nace de la necesidad de saber y de la voluntad de comunicar. Los fabricantes de tractores ponen a nuestra disposición información descriptiva e interesante pero poco profunda en relación con el efecto de los nuevos diseños en los niveles de emisiones. Por otro lado la bibliografía científico-técnica es profusa y está atomizada en múltiples artículos diseminados en numerosas publicaciones de relevancia todas ellas en lengua inglesa. En este contexto, nosotros hemos procurado aunar lo mejor de cada entorno para ofrecer un resumen amplio y muy actualizado que pueda ser asimilado por una amplia audiencia.

TIEMPOS REVUELTOS

Vivimos tiempos de cambio en el mundo de la maquinaria agrícola. Las restrictivas normativas TIER (EE.UU.) o Stage (UE) de emisiones para vehículos de fuera de carretera están forzando la evolución del corazón de los tractores: el motor.

Normalmente en ingeniería el cambio viene provocado por la aparición de una tecnología superior a la existente y su consecuente diseminación en detrimento de la antigua.

Hoy en cambio, y de forma excepcional, la evolución está provocada por la aparición de nuevas demandas para las cuales el sistema no está adaptado. En

nuestro caso, tras años de esfuerzo dedicados a obtener un motor Diesel de altas prestaciones de potencia, bajo consumo y, además, ecológico al nivel de emisiones de CO₂; progresivamente (desde 1996) se demanda también un riguroso control de los niveles de emisión de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de la materia particulada (PM).

► Las dos alternativas: EGR y SCR

Las restricciones iniciales impuestas por la EPA (Environmental Protection Agency) en EE.UU. y por la UE se pueden afrontar modificando los motores para acondicionar los pa-

rámetros de la combustión de tal forma que minimice la generación de estas perjudiciales sustancias. Sin embargo (una vez llegamos al nivel de restricción TIER 4 provisional o Stage IIIB) no es posible verificar la normativa únicamente jugando con las condiciones en las que se produce la combustión sin coartar en exceso la potencia. Por este motivo en la actualidad se propone el tratamiento de los gases de escape, y es aquí donde nos encontramos con una bifurcación en el camino del progreso.

Una vertiente optimiza aún más la combustión mediante la recirculación de gases de escape (EGR) en combinación con un filtro de partículas (DPF) (que, como veremos, es algo más que un simple filtro), mientras que la otra, modifica el rumbo y libera de exigencias adicionales la combustión mediante la reducción catalítica selectiva (SCR) empleando una solución de urea (comercialmente conocida como AdBlue en la UE o EcoBlue en EEUU).

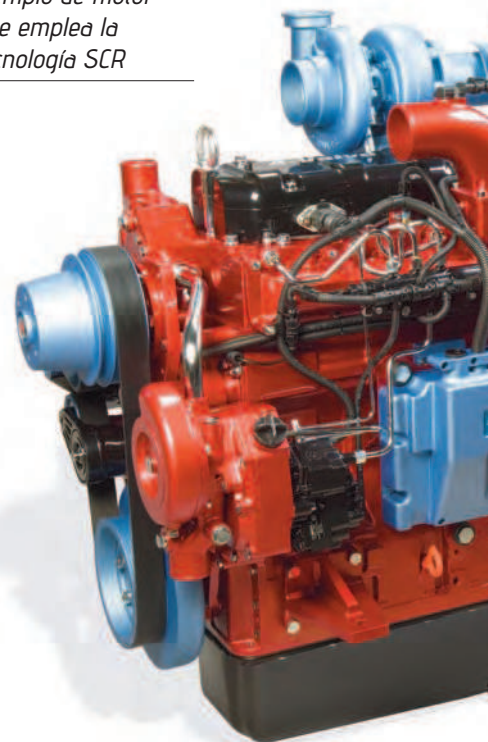
El hecho de que empresas punteras y con experiencia en el sector diverjan en la selección de la tecnología óptima para afrontar la normativa nos indica la proximidad en rendimiento de ambas propuestas subrayando la relevancia y la trascendencia del momento que vivimos. Con el presente artículo pretendemos presentar una instantánea de

este proceso de cambio con el afán de refrendar lo ingenioso de ambas respuestas.

INTRODUCCIÓN A LA NORMATIVA DE EMISIONES PARA VEHÍCULOS DIESEL

En los motores de gasolina, como la admisión se produce a presión atmosférica, no suele haber excedentes de oxígeno por lo que el gran reto no es tanto combatir los NO_x, sino reducir las emisiones de HC y CO. El control de estas sustancias es abordable mediante un catalizador a tres vías (TWC) compuesto normalmente de paladio (Pd) o platino (Pt), para las oxidaciones de HC y CO; y de rodio (Rh) para la reducción del escaso NO_x formado.

Ejemplo de motor que emplea la tecnología SCR



TIPOS DE CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS GASES DE EMISIÓN

Para la evaluación de emisiones, aparte del dióxido de carbono (CO₂), de entre todas las sustancias presentes en el escape de un motor actualmente se tiene en cuenta la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x), de materia particulada (PM), de hidrocarburos (HC) y de monóxido de carbono (CO).

- Los NO_x provienen del nitrógeno (N₂) atmosférico que, en las condiciones extremas de presión y temperatura que se producen en la combustión, se oxida en presencia de oxígeno.
- La materia particulada comprende un amplio espectro de contaminantes en forma de aerosol y entre los que se encuentran distintas formas orgánicas y minerales de carbono procedentes del combustible que no han sido totalmente oxidadas durante la combustión.
- Los HC y el CO provienen en su mayoría de un quemado incompleto del combustible.

Por otro lado, en los motores Diesel clásicos la elevada compresión de los gases de admisión provoca grandes excedentes de oxígeno que, una vez han reaccionado con el combustible, disminuyen la importancia de los HC y del CO en favor de unas disparadas tasas de NO_x.

Por este motivo la normativa para vehículos Diesel se centra en la reducción de la concentra-

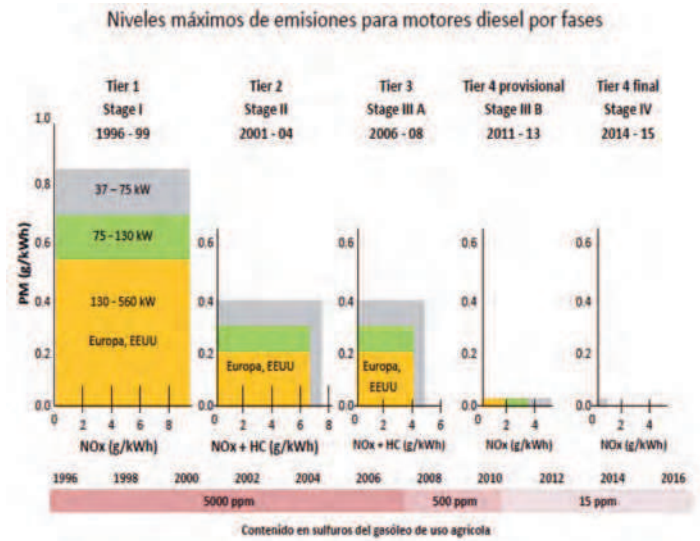
// TRAS AÑOS DEDICADOS A OBTENER UN MOTOR DIESEL DE ALTAS PRESTACIONES DE POTENCIA, BAJO CONSUMO Y ECOLÓGICO AL NIVEL DE EMISIONES DE CO₂; SE DEMANDA AHORA TAMBIÉN UN RIGUROSO CONTROL DE LOS NIVELES DE EMISIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y DE LA MATERIA PARTICULADA //

ción de NO_x, contaminante preponderante; e introduce el concepto de materia particulada (PM) para estimar el valor global del resto de sustancias. Como podemos observar en la **Figura 1** la restrictividad de las sucesivas normas aumenta exponencialmente desde 1996 hasta la actualidad convirtiendo la labor de desarrollo de cada nuevo motor en un desafío digno de un análisis que realizaremos a continuación.

ADAPTACIÓN DE LOS MOTORES

Antes de entrar en el estudio de la producción de NO_x y PM en función de las condiciones en las que se desenvuelve la combustión quisiéramos hacer una precisión: aunque hemos dicho que, desde la inclusión del turbocompresor, los motores Diesel

FIGURA 1 / Restrictividad de las sucesivas normas Tier



disponen de un superávit de oxígeno tal que la incompleta oxidación de los HC y el CO se minimiza, en realidad en la actualidad los elevados niveles de gases de escape recirculados (hasta un 60%) desembocan en una atmósfera pobre en oxígeno que hace rebrotar el problema de su control.

Por ello, todos los motores Diesel Stage IIIB disponen de un catalizador, generalmente de platino (Pt), que favorece la oxidación de estos compuestos en un proceso denominado catálisis oxidativa. Sin embargo, al arrancar el motor, el catalizador no tiene la temperatura suficiente para oxidar todo el caudal de contaminantes, así que se recubre con una capa de zeolita que, mientras se alcanza la temperatura idónea, atrapa los HC, aumentando el rendimiento de oxidación del CO. Una vez la

temperatura de escape es suficientemente elevada la zeolita libera los HC para que sean oxidados. De esta forma se catalizan (es decir, se incrementa la velocidad de reacción) las dos oxidaciones y se amortiguan las diferencias de emisión entre los momentos críticos y los puntos de funcionamiento óptimos.

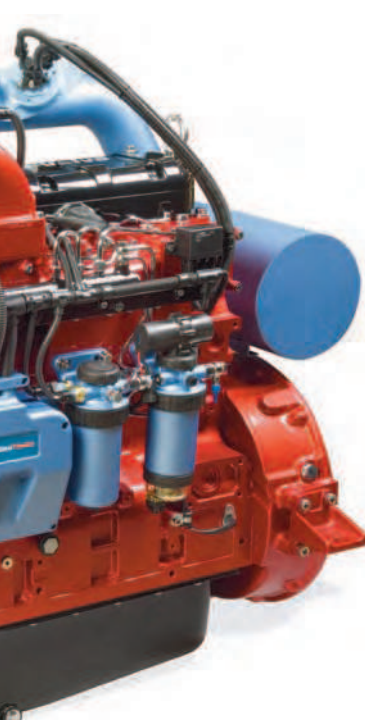
PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Éstos están desarrollados para maximizar la potencia sin producir excedentes de contaminantes, ambos procesos determinados por el tipo de combustión (ver **Figura 2**). Para caracterizar la combustión hay que tener en cuenta la relación combustible-aire, que puede ser expresada mediante el dosado relativo en el chorro inyectado¹, la concentración de oxígeno en ese aire y la temperatura.

Como norma general, las combustiones ricas (en combustible) se producen a temperaturas inferiores con lo que se encuentran dentro del rango de formación de materia particulada, mientras que las combustiones pobres generan mayor temperatura reduciendo la formación

¹ Relación combustible-aire en un instante frente a la relación combustible-aire estequiométrica

$$F = \frac{P}{F_{estequiométrica}} ; \text{ donde } F = \frac{m_{combustible}}{m_{aire}}$$



de PM pero aumentando sin embargo los NO_x.

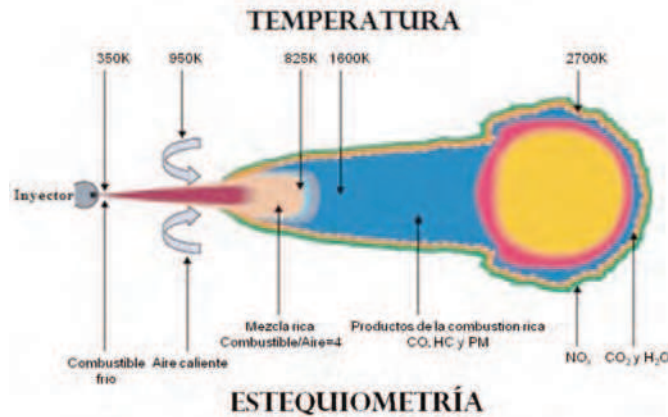
► Fase de combustión

En la **Figura 3** podemos ver el recorrido de la fase de combustión desde la inyección hasta la post-ignición. En abscisas se representa la temperatura (K) y en ordenadas el dosado relativo en el chorro. Encontramos en la figura cuatro recorridos determinados por el nivel de recirculación de gases (a mayor recirculación menor concentración de oxígeno). En un extremo está la curva 1 que se produce en caso de no haber recirculación de gases de escape mientras que la curva 4 se corresponde con una recirculación muy intensa de gases de escape donde, aún produciéndose la combustión con una elevada riqueza de combustible, ésta se desarrolla a bajas temperaturas de forma que la generación de PM y NO_x es escasa. Como podemos ver en la **Figura 3**, el nivel de recirculación de los gases de escape es un factor fundamental en la evolución de temperatura del combustible inyectado en el cilindro ya que puede atravesar o evitar las regiones susceptibles de formación de PM y NO_x; pero esto no es todo, ya que según las características de la inyección, la ignición se producirá en uno u otro momento (correspondiendo con las partes continuas del gráfico).

► Qué ocurre en los motores con EGR y SCR

En los motores actuales con EGR y DPF la recirculación de gases de escape evita la excesiva formación de NO_x, produciendo la combustión en niveles subóptimos desde el punto de vista del rendimiento energético. Por otro lado los motores equipados con SCR alcanzan mayores temperaturas de combustión, lo que supone una mejora en el rendimiento respecto a los anteriores, pero producen

FIGURA 2 / Producción de contaminantes en la combustión. (Adaptada de ASABE Distinguished Lecture #34, pp. 1-24)



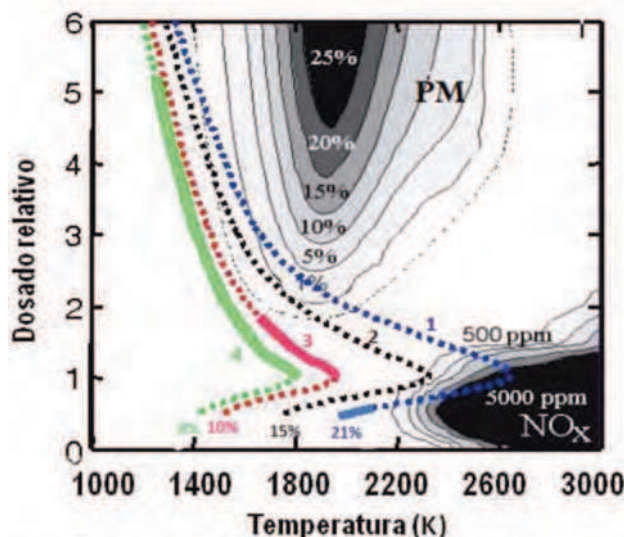
más NO_x que serán eliminados en el tratamiento de los gases de escape. De todas formas no sería justo para los particulares entender este rendimiento contando únicamente el consumo de combustible, para ellos lo importante es la determinación global del rendimiento y, puesto que el SCR fuerza el uso de un segundo fluido, el consumo ya no se debe medir en volumen de combustible por energía (l/kWh), sino en euros de fluido por energía (€/kWh), cuestión que está por determinar.

POST-TRATAMIENTO DE LOS GASES DE ESCAPE

► El DPF, mucho más que un simple filtro en la EGR

Como hemos visto en el apartado anterior, llevando al extremo la optimización de la concentración de oxígeno durante la combustión podemos minimizar la producción de PM y NO_x. No obstante, por bajos que sean los niveles de emisión, siguen produciéndose en pequeñas cantidades. Esta contamina-

FIGURA 3 / Producción de NO_x y de materia particulada (PM) en función del ratio combustible-aire, de la concentración de oxígeno en la admisión y de la temperatura. (Modificado de <http://www.eere.energy.gov/>; US department of Energy)



ción se combate en el DPF y, aunque resulta sencillo comprender el proceso por el cual las PM quedan retenidas en un filtro, no lo es tanto el proceso de reducción de los NO_x a N₂.

El primer paso de este proceso consiste en una homogeneización de la población de NO_x oxidándolos a NO₂ durante la catálisis oxidativa encargada de oxidar los HC y el CO. Cuando el filtro recibe el NO₂ se comporta como un catalizador trampa. La porosidad de los materiales alcalinos y alcalinotérreos de los que está compuesto hace que se comporten de un modo similar a la zeolita del catalizador Diesel. Esto es, cuando las condiciones no son óptimas para facilitar la reducción, el filtro atrapa los NO_x, liberándolos cuando el catalizador funciona a pleno rendimiento. Aquí el problema reside en que cuando el tractor trabaja a poca carga el catalizador no alcanza una temperatura suficiente para liberar los NO_x reduciéndose progresivamente su capacidad de atraparlos. Por ello estos sistemas disponen de rutinas automáticas de reciclaje consistentes en elevar el régimen del motor para incrementar la temperatura en el catalizador y así disminuir la concentración de oxígeno, inyectando combustible en el DPF. Curiosamente aquí no nos interesa el potencial exotérmico del combustible, sino su poder reductor. Por ello debemos evitar que el combustible reaccione con el oxígeno, elevando el régimen y con un catalizador de rodio (Rh) que favorece el paso de NO₂ a N₂.

► El SCR, una respuesta a largo plazo

El sistema anterior presenta una ventana de temperatura y de concentración de oxígeno óptima muy estrecha. Es por esto que aún hoy no está claro si van a ser capaces de verificar la normativa Tier 4 de implantación en 2014. Esto es debido

a que la competencia del oxígeno por el poder reductor del combustible es un duro rival para la reducción de los nitrógenos.

Algunas marcas se han decantado por una reducción catalítica selectiva (SCR) de los NO_x. En este caso el poder reductor procede de la urea o Ad-Blue, pues el amoníaco (NH₃) que ésta libera es un reductor con alta afinidad por los NO_x en presencia del catalizador adecuado. Dentro de este grupo de catalizadores se encuentran materiales tan dispares como el platino y el vanadio, o metales como el hierro, el cobre o el zinc. Aunque disponer de poder reductor a demanda posibilita una combustión más exotérmica, se debe ajustar en pos de minimizar el consumo global de líquidos.

COMBUSTIBLES Y EMISIONES

El hecho más relevante en la evolución del gasóleo de uso agrícola desde la última década del siglo pasado, es la reducción progresiva de los niveles máximos de sulfuros (azufre) desde las 5000 ppm (mediados los 90) hasta las 10 ppm (1 de enero de 2011), del Diesel de ultra bajo contenido en azufre (RD 1088/2010). En el caso de los gasóleos de uso agrícola, se estableció una moratoria de un año que permitía la comercialización de gasóleos con contenidos de azufre superiores, moratoria ya concluida a día de hoy.

La reducción en los niveles de sulfuros es importante por cuanto afecta a la emisión de compuestos azufrados, pero también porque permite la puesta en marcha de tecnologías para la reducción de emisiones como la catálisis oxidativa, el filtro de partículas o los tratamientos de gases de escape para la reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x).

Los filtros de partículas permi-

ten una reducción superior al 90% de la materia particulada (PM, según sus siglas en inglés); entre el 80% y el 100% de reducción de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO); y en torno a un 80% de otros tóxicos no contemplados en la regulación actual (como compuestos aromáticos o carbonilados). Los sulfuros en el combustible se acumulan en filtros y catalizadores e interfieren en las reacciones de eliminación de los NO_x por lo que su presencia en el combustible disminuye la eficiencia en términos de reducción de contaminantes y la vida útil de los filtros de partículas, así como la economía de combustible.

// NO ES POSIBLE VERIFICAR LA NORMATIVA ÚNICAMENTE JUGANDO CON LAS CONDICIONES EN LAS QUE SE PRODUCE LA COMBUSTIÓN SIN COARTAR EN EXCESO LA POTENCIA. POR ESTE MOTIVO EN LA ACTUALIDAD SE PROPONE EL TRATAMIENTO DE LOS GASES DE ESCAPE //

► Políticas a favor de combustibles más limpios

Un claro ejemplo de cómo la evolución de los carburantes impulsa la adopción de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente podemos encontrarlo en la comercialización de la gasolina sin plomo en Alemania. La política de incentivos al empleo de gasolina sin plomo, conjuntamente con el superior gravamen a la gasolina con plomo, resultó en una total implantación de la gasolina sin plomo mucho antes que en el caso de otros países europeos; la fecha prevista por la UE para la retirada definitiva de la gasolina con plomo era el 1 de enero de 2000 pero España obtuvo una moratoria hasta el 1 de enero de 2002. Asimismo, la generalización en el empleo de gasolina sin plomo supuso un gran impulso a la venta de vehículos

con catalizador de tres vías.

En una línea similar de actuación, varios países del norte de Europa han mantenido una política de incentivos al uso de combustibles con bajo contenido en azufre durante los últimos años; es un hecho comprobado que las políticas fiscales sobre los distintos tipos de carburantes tiene una repercusión directa sobre la composición del parque de vehículos.

► El bioDiesel

Actualmente, la alternativa al empleo de gasóleo en vehículos agrícolas la encontramos en el bioDiesel, que se obtiene a partir de lípidos (aceites y grasas)

naturales procedentes de procesos industriales de esterificación y transesterificación y se emplea como sustituto parcial o total del gasóleo obtenido del petróleo.

A lo largo de los últimos años se han llevado a cabo numerosos estudios referentes al empleo de bioDiesel en distintos tipos de motores. La mayor parte de los estudios coinciden que el empleo de mayores proporciones de bioDiesel redundaría en una disminución de la materia particulada (PM), debido principalmente al mayor contenido en oxígeno del bioDiesel, lo que provoca una mayor oxidación de los distintos compuestos en el motor. Por otra parte, este mayor contenido en oxígeno provoca una mayor formación de NO_x que en el caso del Diesel convencional. Por la misma razón, el empleo de bioDiesel también parece

traducirse en la reducción de hidrocarburos y de monóxido de carbono emitidos.

Por último, el empleo de bioDiesel reduce las emisiones de algunos compuestos tóxicos no contemplados en la regulación actual, como los hidrocarburos aromáticos (por su nulo contenido en éstos), mientras que debido a su mayor contenido en oxígeno eleva las de otros compuestos carbonilados igualmente tóxicos.

► Otros combustibles

El empleo de otros combustibles como el gas natural, el propano (GLP o gas licuado del petróleo), el etanol e incluso el hidrógeno podría reportar importantes mejoras en lo relativo a los niveles de emisiones contaminantes producidas por parte de los motores agrícolas pero todavía requiere de desarrollo.

A MODO DE CONCLUSIÓN

Como dice el refrán: en la vida hay que estar a la altura de las circunstancias, cuanto más restrictivas quizás más interesantes.

La necesidad de mejorar la calidad del aire sin mermar la eficiencia de los tractores ha desencadenado una tormenta de creatividad. No sabemos a ciencia cierta cuál de las tecnologías ganará la partida: EGR+DPF o SCR. No sabemos si quiera si será al final una nueva tecnología híbrida la que se lleve el gato al agua, lo que está claro es que merece la pena desentrañar los detalles de su funcionamiento actual para comprender el momento que nos ha tocado vivir, y para prepararnos para el futuro.

REFERENCIAS

Existe una amplia bibliografía a disposición de los lectores que puede solicitarse vía correo electrónico.