

MOTORES DEL PRESENTE PARA EL FUTURO

PARTE II.- CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES EN LOS MOTORES DE LOS TRACTORES AGRÍCOLAS

El control de las emisiones en el escape de los motores agrícolas, necesario para la homologación de tipo CE, se ha venido realizando de acuerdo con la Directiva 77/537/CEE, que sólo considera la opacidad de los gases de escape (presencia de humo) en los motores diésel de los tractores.

En esta Directiva 77/537/CEE, que se corresponde en sus aspectos técnicos con el

Reglamento nº 24 de la Comisión Económica para Europa de la ONU (reglamento conocido como ECE-R24), se establecen límites en la opacidad de los gases de escape cuando el motor funciona con el 80% de la carga máxima, en seis posiciones de régimen distribuidas entre el régimen de potencia máxima y el de 55% de éste o 1 000 rev/min (el mayor de ellos). Para establecer el límite se considera el flujo nominal de gases de escape en L/s (cilindrada [L] x régimen [rev/min] / 120).

Como ensayo complementario se establece el de aceleración libre, midiendo la opacidad de los gases de escape al pasar acelerando sin brusquedad del

régimen de ralentí al de inyección máxima, hasta que corte la inyección el regulador, con el motor colocado sobre el vehículo (embrague conectado y caja de cambios en punto muerto) o en condiciones que lo simulen. El ensayo se repite al menos seis veces hasta conseguir valores estabilizados y se indicará el valor medio de los cuatro considerados como representativos. El objetivo de esta prueba es ofrecer información a las autoridades responsables del control de emisiones en los vehículos para los diferentes Estados Miembros que aplican este procedimiento.

Se puede decir que la opacidad de los gases de escape está

relacionada directamente con el consumo de combustible, por lo que el control de estas emisiones ayuda a mantener un bajo nivel de consumo, lo que favorece al usuario, además del efecto de la medida sobre el ambiente.

Control de emisiones en los motores de las máquinas extraviarias

La Directiva 97/68/CE establece medidas específicas contra la emisión de gases y de partículas contaminantes en los motores que se instalen en máquinas móviles no de carretera, y se modifica en algunos de-

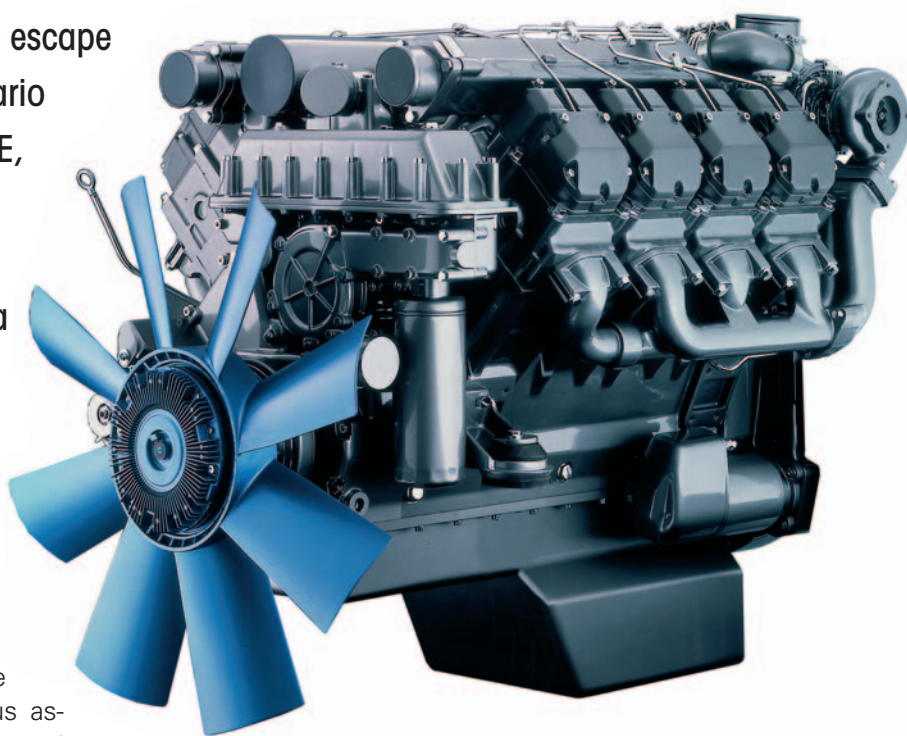


Tabla 1.- Límites máximos admitidos en el nivel de emisiones contaminantes

Fase I	Potencia neta (P) [kW]	Monóxido de carbono (CO)- [g/kWh]	Hidrocarburos (HC) [g/kWh]	Óxidos de nitrógeno (NO _x) [g/kWh]	Partículas (PT) [g/kWh]
A	130 ≤ P ≤ 560	5.0	1.3	9.2	0.54
B	75 ≤ P ≤ 130	5.0	1.3	9.2	0.70
C	37 ≤ P ≤ 75	6.5	1.3	9.2	0.85

Fase II	Potencia neta (P) [kW]	Monóxido de carbono (CO)- [g/kWh]	Hidrocarburos (HC) [g/kWh]	Óxidos de nitrógeno (NO _x) [g/kWh]	Partículas (PT) [g/kWh]
E	130 ≤ P ≤ 560	3.5	1.0	6.0	0.2
F	75 ≤ P ≤ 130	5.0	1.0	6.0	0.3
G	37 ≤ P ≤ 75	5.5	1.3	7.0	0.4
D	18 ≤ P ≤ 37	5.5	1.5	8.0	0.8

Fase IIIA	Potencia neta (P) [kW]	Monóxido de carbono (CO)- [g/kWh]	Hidrocarburos y Óxidos de nitrógeno (HC) + (NO _x) - [g/kWh]	Partículas (PT) [g/kWh]
H	130 ≤ P ≤ 560	3.5	4.0	0.2
I	75 ≤ P ≤ 130	5.0	4.0	0.3
J	37 ≤ P ≤ 75	5.0	4.7	0.4
K	19 ≤ P ≤ 37	5.5	7.5	0.6

Fase IIIB	Potencia neta (P) [kW]	Monóxido de carbono (CO)- [g/kWh]	Hidrocarburos (HC) [g/kWh]	Óxidos de nitrógeno (NO _x) [g/kWh]	Partículas (PT) [g/kWh]
L	130 ≤ P ≤ 560	3.5	0.19	2.0	0.025
M	75 ≤ P ≤ 130	5.0	0.19	3.3	0.025
N	56 ≤ P ≤ 75	5.0	0.19	3.3	0.025
P	37 ≤ P ≤ 37	5.0	Suma (HC) + (NO _x) 4.7		0.025

Fase IV	Potencia neta (P) [kW]	Monóxido de carbono (CO)- [g/kWh]	Hidrocarburos (HC) [g/kWh]	Óxidos de nitrógeno (NO _x) [g/kWh]	Partículas (PT) [g/kWh]
Q	130 ≤ P ≤ 560	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ≤ P ≤ 130	5.0	0.19	0.4	0.025

talles técnicos por la Directiva 2001/63/CE. Posteriormente, ha sido modificada por la Directiva 2004/26/CE, que es el documento que se aplica en la actualidad.

En principio se excluían del campo de aplicación de esta Directiva los motores que montan los tractores agrícolas de ruedas, pero posteriormente, con la publicación de la Directiva 2000/25/CE, se establece que los tractores agrícolas les sean de aplicación las exigencias ya fijadas para las máquinas móviles no de carretera, aunque con unas particularidades y un calendario específico.

De esta manera, la homologación de tipo CE para los tractores agrícolas, que se venía realizando aplicando el reglamento ECE-R24,

cambia, ya que se exige el cumplimiento del Reglamento nº 96 de ECE, equivalente en sus aspectos técnicos a lo que establecía la Directiva 2001/63/CE.

Posteriormente, con la publicación de la Directiva 2005/13/CE, que actualiza la Directiva 2000/25/CE, se fijan los niveles de emisiones que se presentan en la Tabla 1.

En una primera etapa (Fase I) sólo se consideraron motores de más de 37 kW de potencia, mientras que en la segunda etapa (Fase II) se amplía la obligatoriedad hasta potencias de 18 kW. Esto ha sido debido a que resulta más fácil reducir las emisiones en motores de más potencia, por la posibilidad de aplicar la

tecnología disponible en los motores para vehículos de carretera, que en los motores pequeños. Los valores indicados se refieren a los medidos a la salida del motor, antes de cualquier sistema de postratamiento del escape.

Los límites que se establecieron en la denominada Fase 1 se corresponden con los que fija la Directiva 88/77/CEE relativa a gases contaminantes en motores diésel para propulsión de vehículos (modificada según 96/1/CE), que son equivalentes al reglamento ECE-R49 -serie 02- (incluido como Apéndice II del Anexo IV de la Directiva 92/53/CE -antes 70/156/CEE- para la homologación de vehículos a motor y sus

Tabla 2.- Fechas límite para entrada en vigor de las distintas etapas

Categorías	Límites	Fecha tope (homologación)	Fecha tope (comercialización)
A, B, C	Fase I	31-dic-2000	30-jun-2001
D, E	Fase II	31-dic-2000	31-dic-2001
F	Fase II	31-dic-2001	31-dic-2002
G	Fase II	31-dic-2002	31-dic-2003
H	Fase IIIA	31-dic-2005	31-dic-2005
I, K	Fase IIIA	31-dic-2005	31-dic-2006
J	Fase IIIA	31-dic-2006	31-dic-2007
L	Fase IIIB	31-dic-2009	31-dic-2010
M, N	Fase IIIB	31-dic-2010	31-dic-2011
P	Fase IIIB	31-dic-2011	31-dic-2012
Q	Fase IV	31-dic-2012	31-dic-2013
R	Fase IV	30-sep.-2013	31-dic-2014

remolques), por lo que los motores con esta homologación cumplían también la Fase I de la nueva normativa.

Las fechas límite en los motores para los tractores

La Directiva 2005/13/CE establece el calendario completo según el cual se aplicará la normativa de emisiones contaminantes en los gases de escape para los motores de los tractores agrícolas, tanto en lo relativo a nuevas homologaciones de tipo, como de los plazos límite de

puesta en el mercado, según se presenta en la Tabla 2.

La fecha de referencia inicialmente establecida fue el 30 de septiembre de 2000, marcando el cese de concesión de homologación (CE o nacional) de los tractores cuyos motores no se ajustaban a las disposiciones de la Directiva según este calendario, aunque con un retraso inicial de seis meses (categorías E y F), y dando la posibilidad a los Estados Miembros para poder retrasar todos los plazos en dos años (categorías A a G). Asimismo, se indica que estas disposiciones no se aplican a los motores que se instalen en tractores destina-

dos a la exportación de terceros países.

En consecuencia, agotados los aplazamientos admitidos, todos los motores de los tractores agrícolas con potencias entre 37 y 560 kW, a partir del 31 de diciembre de 2005, deben de cumplir al menos la Fase II de la normativa de emisiones contaminantes.

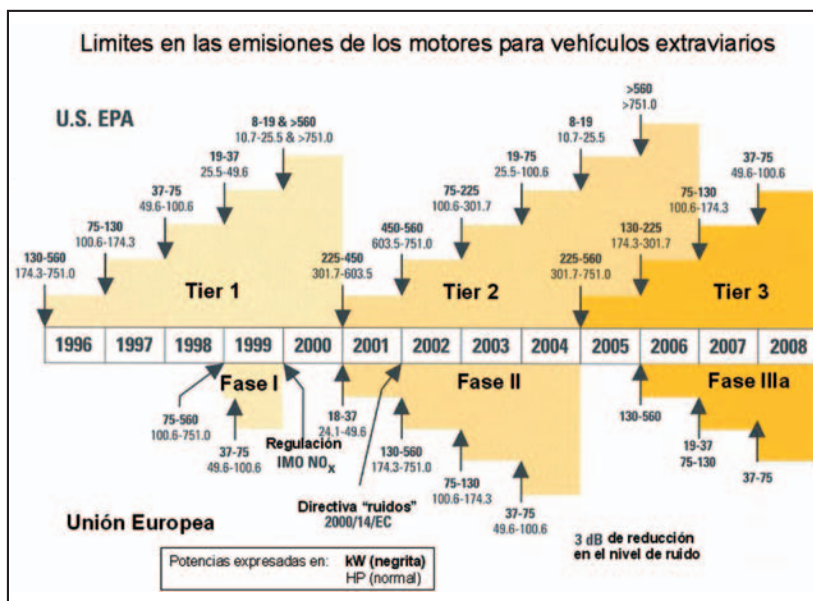
Al igual que ya se hizo en la Directiva 2000/25/CE, en la actualización (Directiva 2005/13/CE) también está previsto el retraso de dos años de las fechas establecidas "para motores que tengan



TODOS LOS MOTORES DE LOS TRACTORES AGRÍCOLAS CON POTENCIAS ENTRE 37 Y 560 kW DEBEN DE CUMPLIR AL MENOS LA FASE II DE LA NORMATIVA DE EMISIONES CONTAMINANTES



Límites de emisiones y fechas de entrada en vigor en EEUU y la UE



una fecha de fabricación anterior a la fecha indicada," dejando abierta la posible revisión de plazos y límites en función de las necesidades que se puedan presentar; existe la posibilidad de fabricar 'motores sustitutivos' para reponer los de los tractores en uso, cumpliendo la normativa que se aplicaba en el momento de la comercialización del tractor.

Para los tipos o familias de motores que cumplan los valores límite establecidos antes de las fechas de cumplimiento obligatorio, está previsto que los Es-

tados Miembros permitan un etiquetado y marcado especiales que muestren que los equipos en cuestión cumplen los valores exigidos antes de las fechas estipuladas.

También se pretende armonizar niveles y plazos con la evolución de la reglamentación que se imponga en EEUU (EPA) y Japón. En el gráfico adjunto se refleja la evolución comparativa entre la Unión Europea y los EEUU.



El procedimiento de ensayo

La ejecución de los ensayos para determinar los niveles de emisiones gaseosas en el escape requiere disponer de un laboratorio altamente especializado, ya que hay que analizar, con gran precisión, los gases de escape (CO, HC y NO_x) y partículas procedentes del motor situado en el correspondiente freno dinamo-métrico.

Las condiciones atmosféricas de referencia son 99 kPa y 278°K (25°C) y el motor debe de estar equipado con sistema de filtración de aire, o dispositivo equivalente, y con silenciador de escape similar al que se utilizará en el tractor. Por tanto la potencia obtenida en el freno dinamo-métrico sería 'potencia neta'.

En estas condiciones se realiza un ciclo de prueba con ocho puntos (especificación A – motores de régimen variable), en los que se modifican el régimen de giro del motor y el porcentaje de

carga, según los valores que se presentan en la Tabla 3.

El régimen de giro intermedio será el correspondiente a par máximo, si éste se sitúa a un régimen entre al 60 y el 75% del régimen nominal. Si el par máximo se encuentra a un régimen inferior al 60% del régimen nominal, o superior al 75%, se tomarán estos valores de régimen como 'régimen intermedio'.

Una vez acondicionado el motor para estabilizar los pará-

metros característicos, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, se inicia la secuencia de prueba siguiendo el orden creciente de los puntos del ciclo, manteniéndose en cada punto un tiempo de diez minutos como mínimo, de-

terminándose los valores de concentración en las emisiones de gases de escape en los últimos tres minutos (registro continuo o recogida en bolsas para posterior análisis) de cada punto. La toma de muestras de partículas se realizan mediante filtro único (20 segundos) o filtros múltiples (60 segundos) lo más tarde posible en el periodo de funcionamiento correspondiente a cada punto. Asimismo, hay que registrar la temperatura del combustible que llega a la bomba de inyección.

El valor correspondiente a las emisiones es el calculado, a partir de los valores medios en cada punto del ciclo, con los factores de ponderación correspondientes, que se presentan en la Tabla 3.

Dado que el ensayo del motor se realiza fuera del vehículo sobre el que se pretende utilizar, la depresión de admisión no debe de sobrepasar un determinado valor que aparece reflejado en la ficha con las características esenciales del motor, o familia de motores, para el régimen nominal y el 100% de la carga. De manera similar se limita la máxima contrapresión de escape en condiciones similares a las indicadas para la aspiración.

Como forma de reducir los costes de los ensayos se establece la posibilidad de agrupar



 **PARA REDUCIR EL COSTE DE LOS ENSAYOS SE ESTABLECE LA POSIBILIDAD DE REALIZARLOS AGRUPANDO LOS MOTORES POR FAMILIAS** 

Tabla 3.- Ciclo de ensayo para determinar el nivel de gases nocivos en el escape (especificación A – motores de régimen variable)

Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Régimen giro	nominal	nominal	nominal	nominal	interm.	interm.	interm.	ralentí
Carga (%)	100	75	50	10	100	75	50	-
Factor ponderación	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15

motores por familias, considerando como tales los que pueden tener un comportamiento similar en cuando a las emisiones de gases y partículas de escape. Los motores de estas familias pueden diferenciarse, por ejemplo, en el número de cilindros, pero disponen de elementos comunes (ej.: diseño de la cámara de combustión) que hacen que las emisiones gaseosas producidas sean similares. En estos casos, el motor ensayado debe de ser el de más altas emisiones en el conjunto de la familia.

En el Apéndice 5 de la Directiva 2004/26/CE se establecen los requisitos de durabilidad, en lo que se refiere al mantenimiento del nivel de emisiones, para los motores que cumplen las fases IIIA, IIIB y IV, fijando los niveles de durabilidad PDE (periodo de devaluación de emisiones) para las diferentes categorías de motores; para los motores de más de 37 kW de potencia, este PDE es de 8 000 horas.

Consideraciones sobre la emisión de los óxidos de nitrógeno (NO_x)

Tomando como referencia la combustión de un hidrocarburo tan simple como el metano (CH₄), cuya molécula necesita dos moléculas de oxígeno (O₂), si la combustión es perfecta, se produciría una molécula de anhídrido carbónico (CO₂) y dos moléculas de agua (H₂O). En términos de masa, para quemar 16 kg de metano se necesitarían 64 kg de oxígeno, que se encuentran en 276.8 kg de aire. En principio, el nitrógeno, que forma parte en un elevado porcentaje del aire que entra en el motor, debería de quedar inalterado.

Sin embargo, dada la rapidez en la que se realiza la mezcla y el proceso de combustión, la reacción no es tan perfecta. Así, en el caso del metano se necesitan

EL MOVIMIENTO DEL AIRE EN CONTRA DE LA INYECCIÓN DEL COMBUSTIBLE FAVORECE LA MEZCLA Y UNA COMBUSTIÓN COMPLETA

3.5 moléculas de oxígeno por cada dos de metano, con lo que aparece una molécula de anhídrido carbónico, otra de monóxido de carbono (CO) y 4 de agua, pero, además, parte del combustible sin quemar, partículas procedente de la combustión y óxidos de nitrógeno (NO_x), estos últimos como consecuencia de la reacción del nitrógeno del aire por las altas temperaturas que se alcanzan en la combustión. Dado que la temperatura alcanzada es más elevada a medida que aumenta la eficiencia de los motores, los óxidos de nitrógeno siempre tendrían que ir unidos a ellos.

Si se utilizan hidrocarburos de cadena larga y en mezcla, como sucede en el gasóleo (con base cetano -C₁₂H₂₆), la situación se complica, y resulta más difícil

realizar una combustión completa para reducir las emisiones contaminantes de los gases de escape.

Además, hay que tener en cuenta que:

- La temperatura de vaporización del gasóleo es más elevada que la de la gasolina.
- El encendido por compresión exige una mezcla muy rápida de aire y gasóleo, y ésta es poco homogénea.
- Si el exceso de aire no es suficiente, aumentan las emisiones de hollín, monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC).
- La combustión se inicia en el momento de la inyección y afecta al rendimiento del motor.
- La temperatura de combustión influye en la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x).

Para conseguir una purificación de los gases de los gases de escape se puede actuar:

Sobre la forma de la cámara de combustión, de manera que:

- Los motores con precámara expulsan menos NO_x que los motores de inyección directa (estos consumen menos combustible).
- El movimiento del aire en contra de la inyección del combustible favorece la mezcla y una combustión completa. La inflamación precisa una temperatura alta.

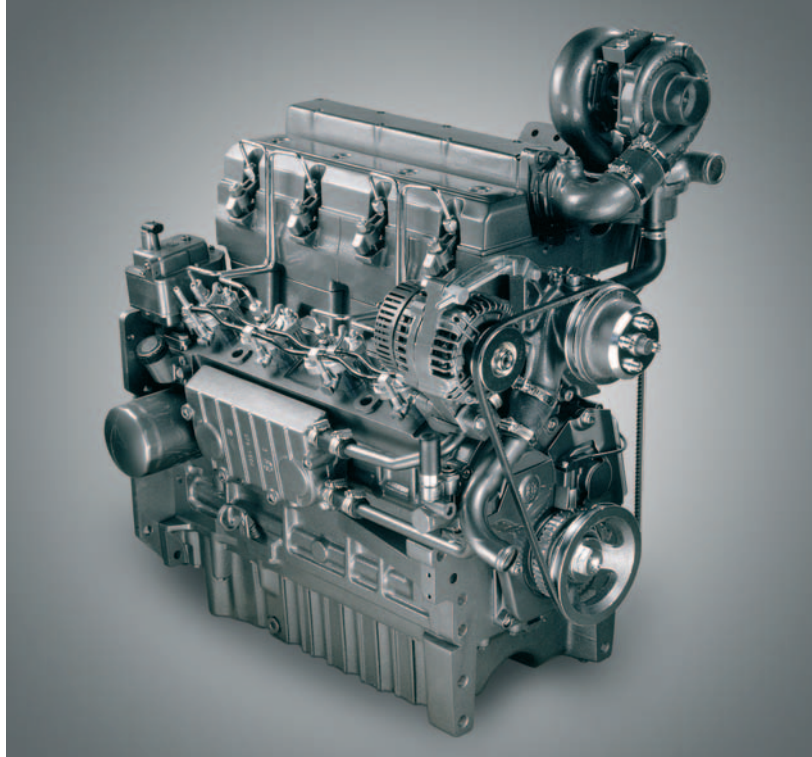


Sobre la inyección del combustible, ya que:

- La pulverización del combustible influye en la emisión de sustancias contaminantes, de manera que una inyección retardada disminuye la emisión de óxidos de nitrógeno y un mayor retardo aumenta la emisión de HC y el consumo de combustible.
- La variación de un grado en el ángulo del cigüeñal sobre el valor nominal de comienzo de la inyección puede elevar las emisiones de NO_x y HC entre el 5 y el 15%.
- La elevada sensibilidad obliga a una regulación muy precisa de los ciclos de inyección (preferentemente regulación electrónica y marca en el cigüeñal), y se consigue gran precisión si el inicio de la inyección se mide directamente en la válvula de inyección (sensor en la aguja del inyector).
- El combustible que llega a la cámara de combustión después de que finaliza la combustión, puede pasar al tubo de escape sin quemarse, aumentando la emisión de HC, por lo que se necesita que las válvulas de inyección acumulen, entre el asiento de estanqueidad y el extremo del orificio de inyección, el menor volumen de combustible posible.
- El combustible finamente pulverizado favorece la mezcla de aire y combustible (muy alta presión y forma de los orificios), lo que contribuye a reducir la emisión de HC y partículas (hollín).
- Se necesita limitar la cantidad de combustible en relación con la cantidad de aire aspirado (exceso de aire mínimo del 10 al 20%).

Por otra parte, la temperatura del aire aspirado afecta a la emisión de gases, de manera que:

- Si aumenta, se eleva la temperatura de combustión y la emisión de NO_x.



LA VARIACIÓN DE UN GRADO EN EL ÁNGULO DEL CIGÜEÑAL SOBRE EL VALOR NOMINAL DE COMIENZO DE LA INYECCIÓN PUEDE ELEVAR LAS EMISIONES DE NO_x Y HC ENTRE EL 5 Y EL 15%

- El enfriamiento del aire comprimido en los motores turboalimentados es efectivo para reducir las emisiones de NO_x.

Como alternativa para sustituir el aire en exceso, que se necesita en los motores diésel, se puede recurrir a la retroalimentación parcial de los gases de escape.

- Si el aire aspirado se mezcla con gases de escape se reduce la entrada de oxígeno de la sobrealimentación y se eleva su calor específico, lo que reduce la temperatura de combustión (menor formación de NO_x) y la cantidad de gases de escape expulsados.
- Si se recupera una cantidad excesiva de gases de escape se aumenta la emisión de partículas y CO por la insuficiencia de aire (oxígeno), por lo que hay que establecer una limitación de la cantidad de gases recuperados para disponer de aire suficiente en la cámara de combustión para el gasóleo inyectado.

También se puede recurrir al tratamiento posterior de los gases de escape empleando catalizadores de metales nobles para reducir la emisión de HC, aunque teniendo en cuenta que los catalizadores que se utilizan en los motores de explosión trabajan solo con insuficiencia de oxígeno o con una mezcla combustible+oxígeno muy precisa, por lo que no sirven para motores diésel.

Para limitar la emisión de sólidos (partículas) se están utilizando filtros que se colocan en el tubo de escape. Además, se puede aportar en el escape productos como la urea para transformar los óxidos de nitrógeno.

En resumen, estas son las alternativas que pueden utilizar los fabricantes de motores para superar los límites progresivos que imponen las Directivas sobre emisiones contaminantes. ■

 **LUIS MÁRQUEZ**
DR. ING. AGRÓNOMO