

## **LA INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE EN EL MOTOR DIESEL ACTUAL.**

### **Commonrail + Regulación electrónica**

La totalidad de los motores de los tractores agrícolas tienen la necesidad de contar con un regulador de la inyección de combustible. La palanca del acelerador selecciona en cada momento el régimen de funcionamiento al cual debe actuar el regulador. La regulación de la inyección de combustible se hizo en el pasado basada en el principio del regulador que Watt diseñó para su motor de vapor. Esto es por el balance entre contrapesos que se mueven en función de un balance de fuerzas entre el régimen rotacional del motor que los centrifuga y unos resortes que lo comunican mecánicamente con la bomba de inyección.

Está claro entonces que es sólo el régimen del motor en relación a una posición fijada de aceleración, quien regulaba el volumen de combustible que debía inyectarse. Este elemento, presente tanto cuando se utilizan bombas en línea ó rotativas, permite mantener más ó menos constante el régimen de funcionamiento del motor, gracias a la variación del volumen de inyección en cada embolada. Según sea la carga demandada, variará la fuerza centrífuga que se genera sobre unos contrapesos ó masas en rotación que están sobre un eje con velocidad proporcional a la del motor. Cada vez que el esfuerzo aumente, los contrapesos se separan y el regulador incrementa el volumen de inyección generando más trabajo y equilibrando la mayor demanda, manteniendo casi constante el régimen de rotación del motor. Lo contrario ocurre cuando el motor aumenta las vueltas por disminución del esfuerzo solicitado.

Como resultado de su trabajo, el motor entrega un torque y una potencia efectiva nula, cuando la carga demanda es cero, entregando en ese punto el mínimo volumen de inyección. A medida que aumenta la carga, se llega hasta un volumen máximo que se corresponde con una potencia máxima ó nominal, quedando definida, entre ambos puntos, la zona de acción del regulador. La caída del régimen entre ambos puntos suele estar entre 7 y 15%. Si la carga sigue aumentando el motor baja significativamente las vueltas, pero puede equilibrar la mayor demanda, gracias fundamentalmente a la mejora del rendimiento volumétrico y ese es el mejor llenado de aire de los cilindros el cual define una nueva zona que es la de sobrecarga estable. Una vez que se alcanza el mejor rendimiento volumétrico, el cruce de válvulas del motor pasa a ser una desventaja, parte del aire que entra sin inercia suficiente puede volver a salir y el motor está próximo a apagarse.

Este comportamiento en los últimos años se ha modificado y aparecieron en un principio los motores llamados “de potencia constante” en los cuales para un amplio régimen de funcionamiento, la potencia no varía. Las mejoras tecnológicas de la actualidad permiten contar con motores cuya potencia máxima se encuentra en la zona de sobrecarga estable. Aquellos primeros motores de potencia constante tenían una gran reserva de par y contaban con un turbo compresor cuya máxima eficiencia estaba en un régimen menor al nominal. A su vez había un regulador que inyectaba en dos etapas.

En aquel viejo sistema de inyección era imposible separar la generación de presión, de la inyección de combustible, ya que la presión aumentaba con el régimen de giro del motor y con el caudal inyectado. Además la presión aumentaba constantemente hasta alcanzar un máximo luego del cual descendía bruscamente. Los caudales pequeños de inyección se inyectaban a bajas presiones y los caudales podían aumentar a altas presiones. Las consecuencias de ello eran que los caudales de inyección pequeños se inyectaban a presiones bajas y que la presión punta de inyección era más del doble que la presión de inyección media (Fig 1)

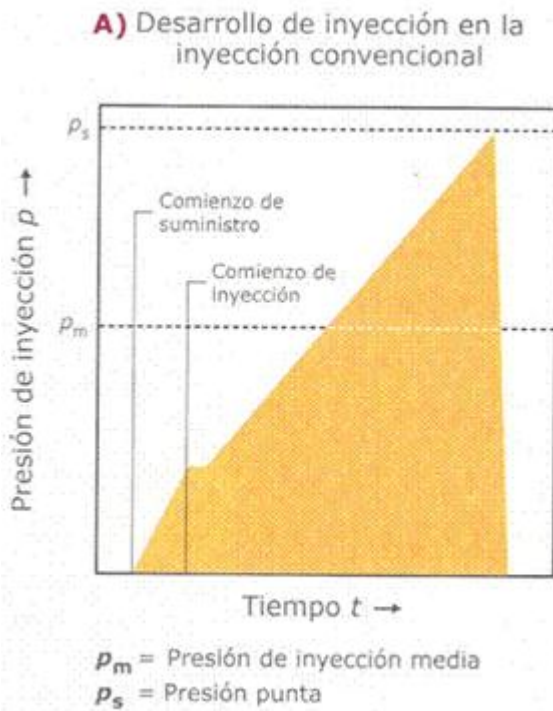


Fig 1. Inyección en un sistema antiguo

Este es un diagrama típico triangular de presiones donde se aprecia que la presión aumenta en forma constante mientras se está inyectando el combustible y

desciende bruscamente hasta el valor de la presión de cierre del inyector al final de la inyección, ocasionado por la caída de presión en el combustible que viene de la bomba de inyección.

## **EL “COMMON RAIL”**

Prácticamente la totalidad de los actuales motores están dotados del sistema de inyección llamado *common rail* (tubo común), cuyo principio de funcionamiento radica en independizar la presión, del caudal de inyección y por tanto del régimen. La presión se genera en un conducto común y se mantiene constante durante todo el tiempo de inyección, merced al trabajo de una bomba de tres pistones.

El sistema de inyección *common rail* fue desarrollado originalmente por el Grupo Fiat Auto y la Universidad de Zurich y su principio de funcionamiento es contar con gas-oil almacenado a presión constante que esté disponible para la inyección de manera instantánea, y acompañado actualmente de inyectores cuya apertura se produce por la vibración de un material piezoeléctrico que es excitado por una corriente eléctrica que en el instante apropiado hace llegar el CPU del ECU (*Engine Control Unit*) que es la computadora básica del sistema de regulación electrónica.

Así, la presión de inyección se produce con independencia del régimen de giro del motor y del caudal de combustible inyectado. El combustible está a una presión cercana a 2000 bares. Hay una unidad de gestión electrónica (Data Logger) que recibe información de numerosos sensores, en el orden de una docena y no únicamente la presión y decide en consecuencia el momento de la inyección y el caudal inyectado. Los sensores brindan información acerca de la posición del acelerador, el régimen de giro del motor, el caudal de aire aspirado, la presión de sobrealimentación, la presión en el *common rail* y la posición del pistón en cada cilindro. Esa ECU, además realiza otras funciones como decidir la sobre presión del turbo compresor.

El caudal de inyección y la presión se establecen por separado, no teniendo relación alguna en ningún momento de la inyección. La inyección se realiza como mínimo en dos etapas, siendo muy frecuente hoy usar seis etapas, es decir cinco inyecciones previas menores para preparar las mejores condiciones en la cámara de combustión tendiendo a mejorar el rendimiento térmico y disminuir el ruido. Luego se produce la inyección principal manteniendo constante la presión y generalmente se produce una inyección complementaria en la fase de expansión con el objetivo de evaporar el combustible y crear condiciones de reducción de los

gases de escape los cuales atraviesan un catalizador para reducir los óxidos de nitrógeno (Fig2).

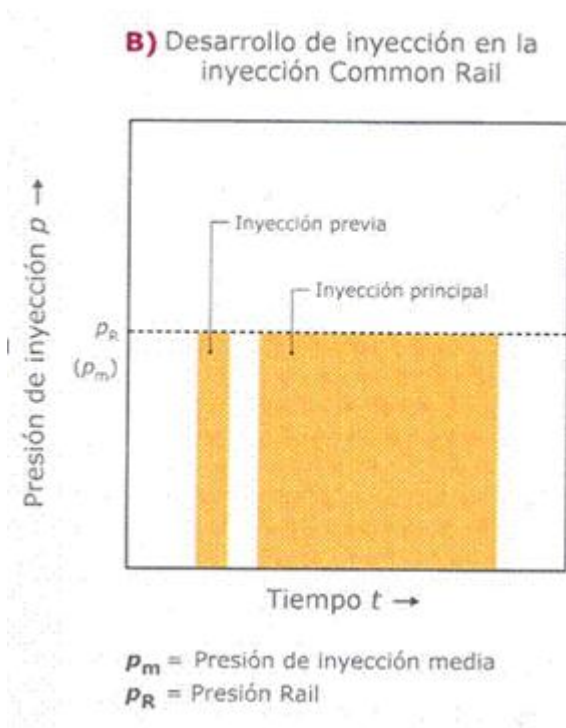


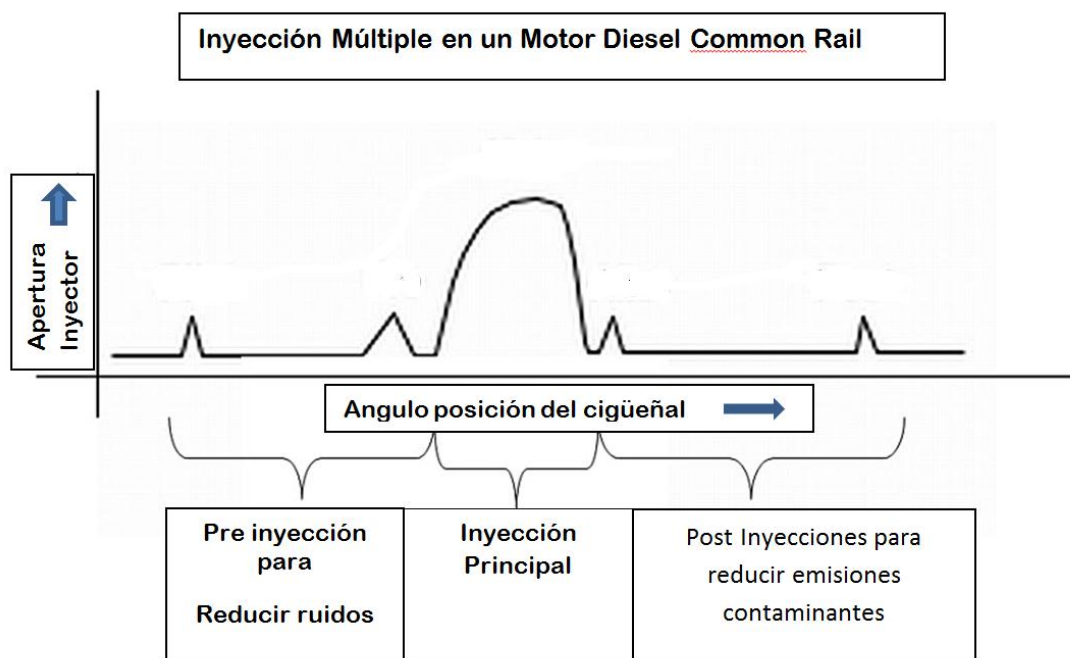
Fig.2. Inyección en uno de los primeros sistemas *common rail*

Con el tiempo se fue tendiendo a incrementar el número de inyecciones en cada tiempo. Hoy día se trabaja con entre seis y hasta ocho inyecciones. Esto ha merecido dividir estas inyecciones en 1. Previas, 2. Principal y 3. Post Inyecciones.

Las previas pueden ser dos: una primera que lleva el nombre de Piloto y una segunda pequeña inyección previa. Ambas cumplen con dos objetivos: 1. Reducir el ruido, el típico golpeteo de los motores Diesel de regulación mecánica, adonde la inyección se hacía en una sola etapa, lo que provocaba el característico golpe de los viejos motores de ciclo Diesel. 2. Por otro lado, al separar el volumen total en varias inyecciones se evitan picos de temperaturas tan altas que son las responsables del incrementos de los óxidos de nitrógeno (NOx), que no permitirían al motor ser homologado dentro de la legislación vigente.

Luego se produce la Inyección principal, responsable del mayor volumen de combustible que ingresa en el ciclo. Las inyecciones previas lo que hicieron es preparar la cámara de combustión para una mayor eficiencia del quemado de este combustible.

Al final se producen, por lo menos, dos inyecciones más, que llamaremos Post Inyecciones. Inclusive la última se pretende que directamente no participe en la combustión útil para incrementar el par motor, sino que se hace para que la fuerte oxidación de ese gasoil provoque la reducción de los óxidos de nitrógeno (NOx) a nitrógeno elemental (N<sub>2</sub>) reduciendo así las emisiones contaminantes que provocan mayor preocupación en el funcionamiento de los actuales motores de tan alta eficiencia y por tanto de altas temperaturas que son las responsables de un incremento de los (NOx), a pesar de reducir los otros contaminantes liberados por los motores.



Para tener una cabal idea de adonde llega hoy el desarrollo tecnológico europeo de los motores Diesel, es oportuno recordar que para un régimen de funcionamiento del orden de las 2100 a 2400 v.min<sup>-1</sup> y una carrera de sus pistones del orden de 130 a 135 mm, considerando además adelanto de inyección, toda la descripción anterior de las cinco y hasta ocho inyecciones debe producirse en algo menos de 23 milésimas de segundo.

## COMPONENTES DEL SISTEMA



Fig 3. Conducto común (*Commonrail*)

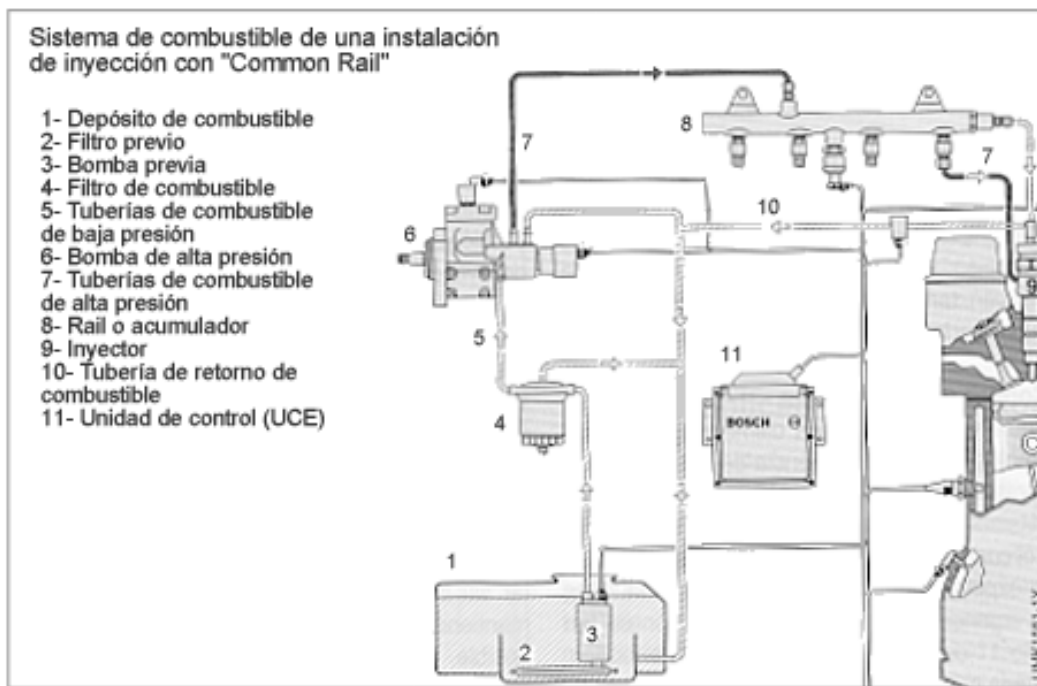


Fig 4. Componentes del sistema

Existe una parte de baja presión que entrega el combustible a la parte de alta presión. La parte de baja presión abarca el depósito de combustible (1), la bomba de alimentación (2), que abastece de combustible a la bomba de alta presión (6), y el filtro de combustible (4).

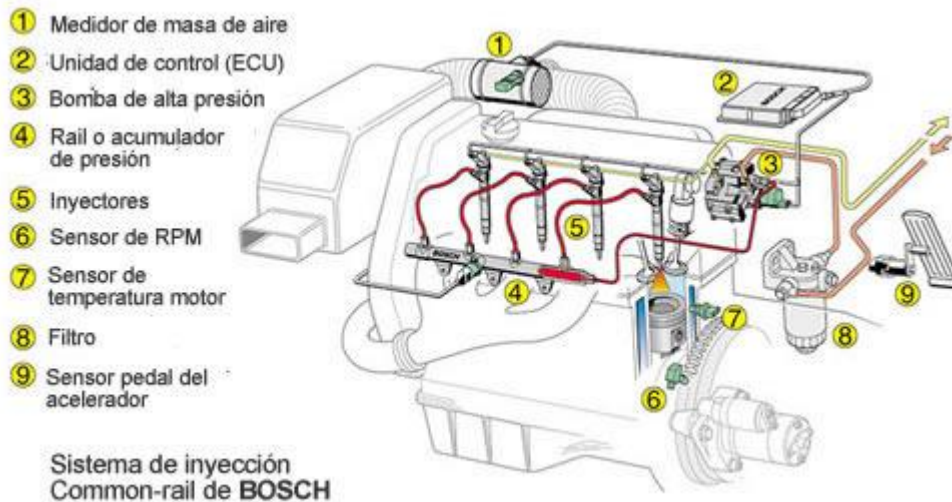


Fig 5. Elementos constitutivos del circuito

La bomba de alta presión suele ser una bomba de tres pistones radiales que trabaja a unas 3000 v/min y se lubrica con el mismo combustible, el combustible se comprime en el interior de tres recintos por la acción de tres émbolos dispuestos radialmente a 120° (Fig 6). Ella alimenta de combustible al conducto común. Este tiene un sensor de presión y una válvula limitadora de la presión de manera de mantener la presión constante en cada uno de los inyectores.



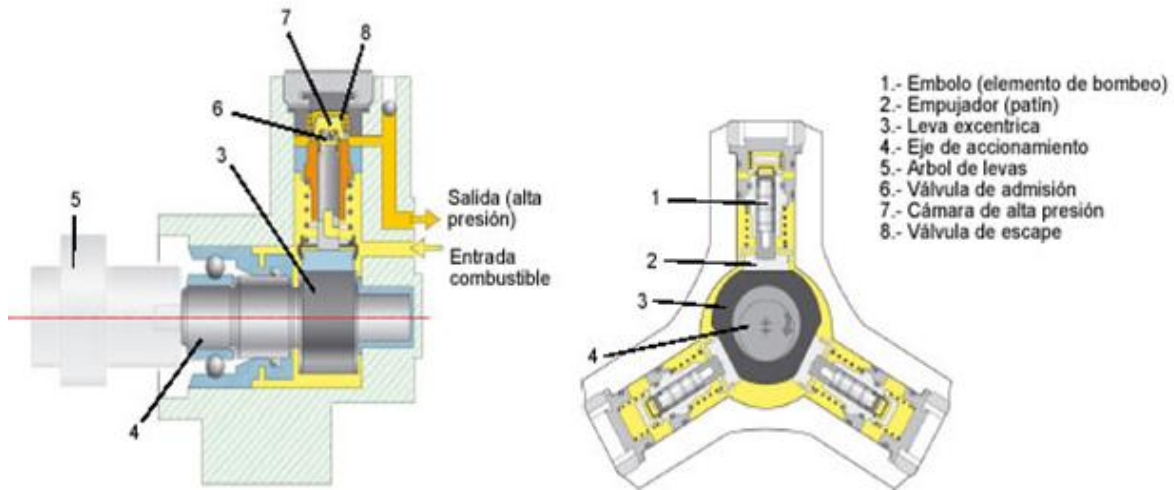


Fig 6. Bomba de tres pistones radiales

Los inyectores actualmente suelen ser piezoeléctricos, es decir que se activan eléctricamente. Los materiales piezoeléctricos están conformados por ciertos cristales que al ser sometidos a un campo eléctrico se deforman.

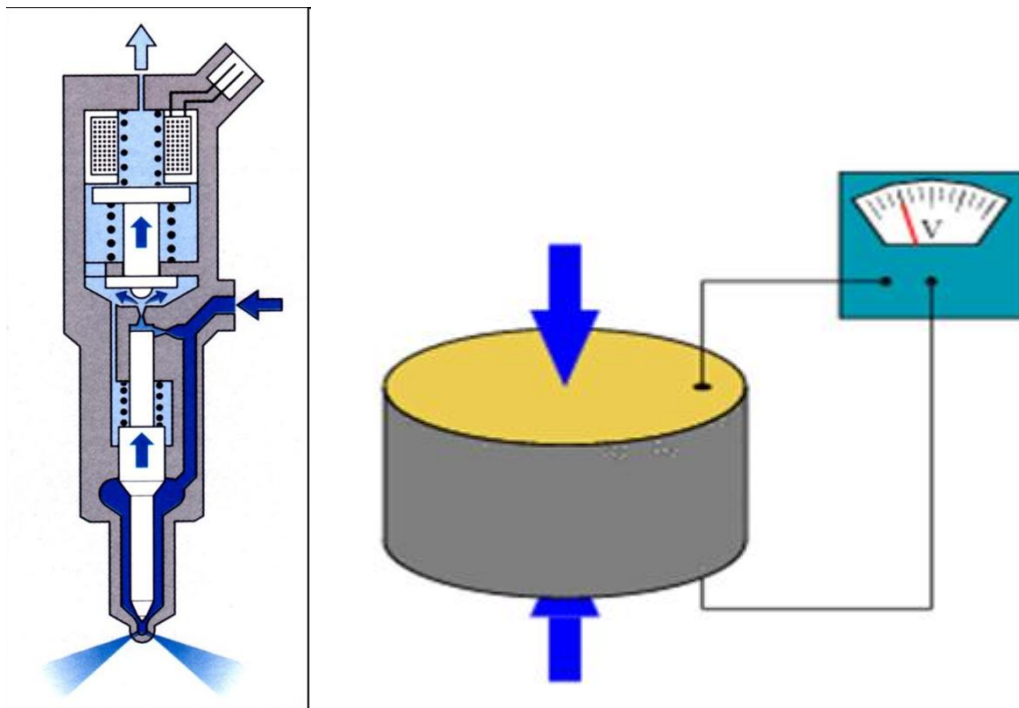


Fig 7. Inyectores piezoeléctricos

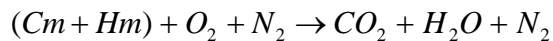
La cantidad de aperturas y cierres de un inyector es algo superior a 1 billón de veces. Se activan tan rápidamente que pueden dividir la inyección en 5 ó 6 inyecciones por ciclo en 200 microsegundos (Fig 7).



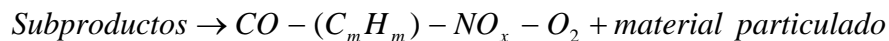
Este conjunto de elementos terminan conformando un motor con un altísimo rendimiento térmico, de muy bajo consumo específico, pero con óxidos de nitrógeno como especial agente contaminante por trabajar a tan altas temperaturas. Los óxidos de nitrógeno forman lo que se conoce como “smog fotoquímico” e intervienen en reacciones muy complejas que contribuyen con la lluvia ácida, destrucción del ozono y enfermedades bronquiales y tiene una valoración de aporte al efecto invernadero de 23 veces el anhídrido carbónico.

En una combustión completa e ideal las cadenas de hidrocarburos deberían convertirse en dióxido de carbono y vapor de agua. El nitrógeno está presente en la atmósfera en un alto porcentaje. Es un elemento muy estable y difícil para formar compuestos, sin embargo las altas temperaturas desarrolladas en los motores *commonrail*, hacen que se oxide produciendo óxido nitroso (NO<sub>2</sub>). Los otros contaminantes presentes en los gases de escape son: monóxido de carbono, cadenas de hidrocarburos que no se oxidaron completamente, partículas de hollín y los ya mencionados óxidos de nitrógeno.

En condiciones ideales de combustión



En condiciones reales



El material particulado abarca partículas de carbón, fracción orgánica soluble y sulfatos, y se utilizan filtros especiales para su control. Es un producto que se acumula en los pulmones, disminuyendo su función, contribuye a síntomas respiratorios agudos y bronquitis crónicas.

Para reducir el material particulado se trabaja en el rediseño de la cámara de combustión, adelanto de la inyección, aumento de la presión de inyección y optimización del direccionamiento de las gotas de combustible.

En la actualidad el principal desafío tecnológico es reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno ya que cada vez que tengamos un motor más eficiente, aumentarán las probabilidades de que el N<sub>2</sub> se combine para formar óxidos. Reducir las emisiones de dichos óxidos deberá pagarse con un aumento de la ineficiencia del motor, por ende más consumo de combustible.

Una alternativa para reducir la cantidad de óxidos formados es recircular gases de escape con lo cual se mantiene la temperatura de la cámara de

combustión a un valor inferior a la temperatura a la cual se forman los NOx. Una cantidad pequeña de gases de escape (14% como máximo) se introduce dentro del ciclo de admisión diluyendo la carga de mezcla, disminuyendo el contenido de oxígeno y por consiguiente la temperatura alcanzada en la combustión. Según las condiciones de operación del motor, la unidad de gestión electrónica regula la cantidad de gases de escape que se mezcla con la carga de admisión (Fig 8).

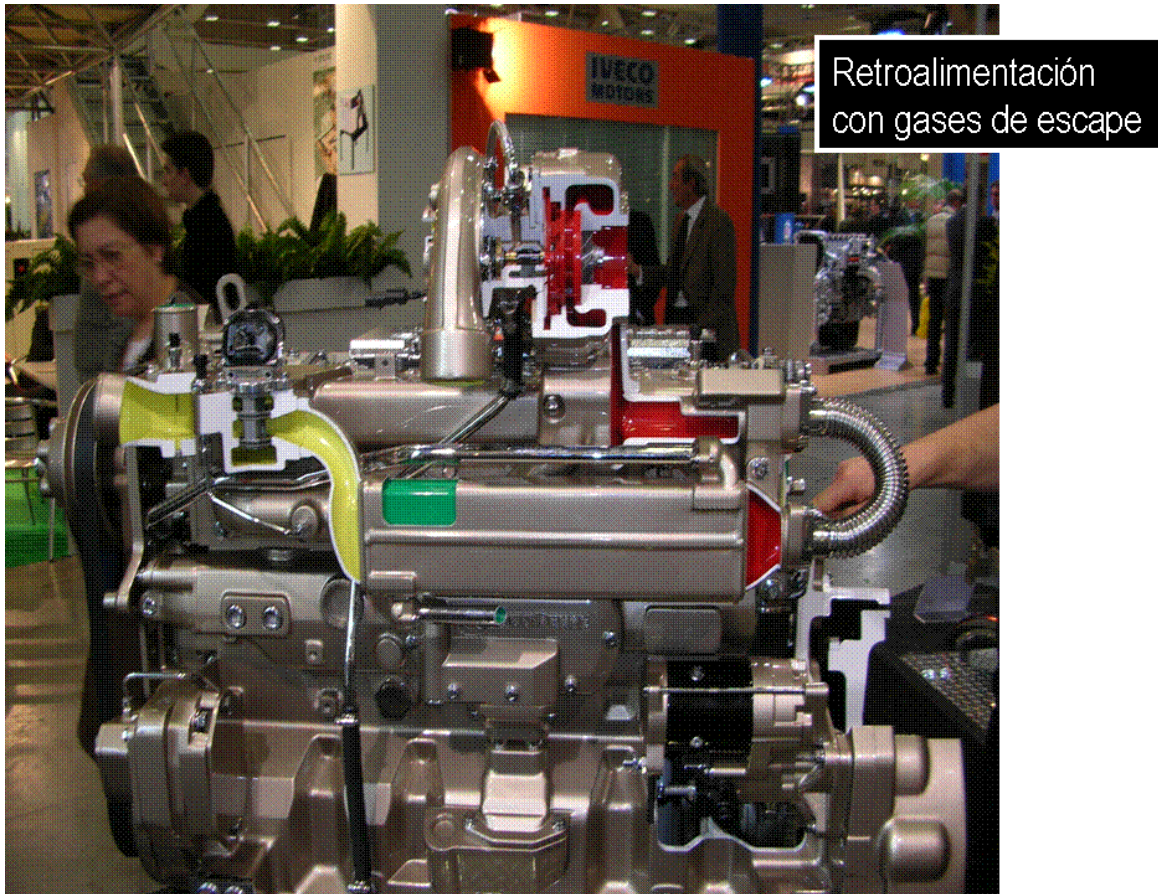


Fig 8 Retroalimentación con gases de escape

Otra alternativa para reducir la emisión de óxidos de nitrógeno y mantenerla por debajo de exigencias ambientales, tales como la Euro 4, pero que a su vez no resigna el bajo consumo logrado, es la colocación de un catalizador por donde pasan los gases de escape y donde es pulverizada urea en solución, que al oxidarse logra una reducción del nitrógeno a elemental ( $N_2$ ). Fig 9.

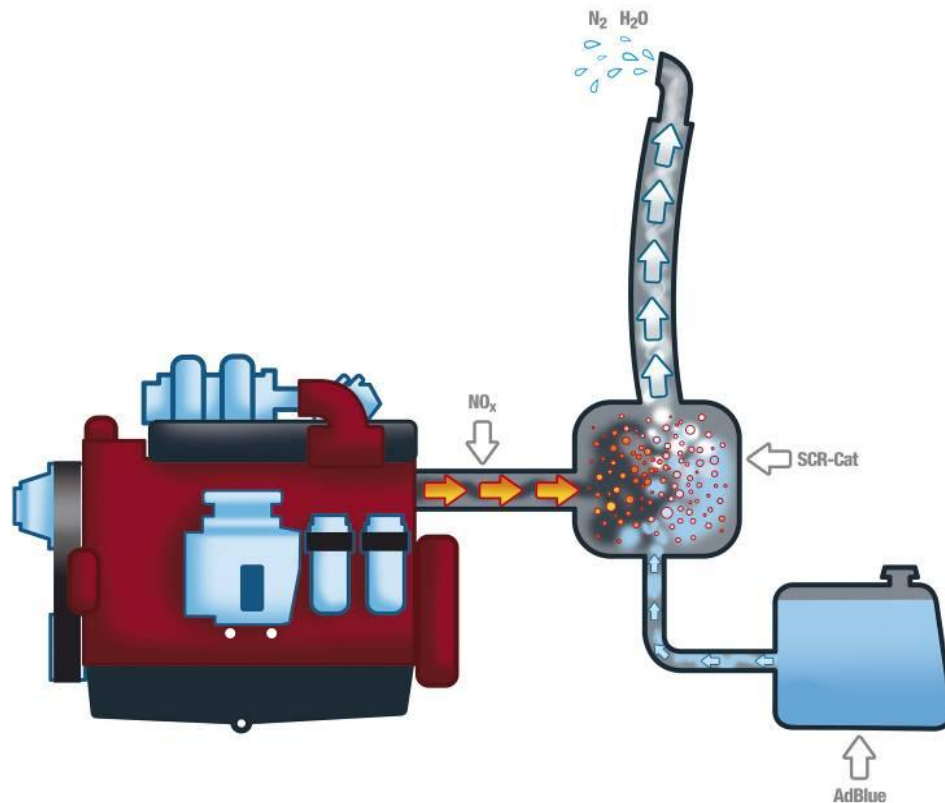


Fig. 9. Tecnología SRC (Reducción Catalítica Selectiva)

Para evitar la formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en los gases de escape de los motores habría que reducir las temperaturas de combustión, pero esto hace que disminuya su rendimiento energético. Para mejorar la eficiencia energética y cumplir la normativa de emisiones contaminantes de los motores, se puede recurrir a transformar el  $\text{NO}_x$  en nitrógeno atmosférico y agua mediante una reacción catalítica.

Para ello se utiliza urea líquida (solución al 32,5% en agua) como aditivo que se inyecta en los gases de escape a la salida del motor, en un porcentaje de aproximadamente el 5% del combustible. La urea en solución líquida, popularizada en Europa bajo la denominación reglada en Alemania de AD BLUE, y DEF (Diesel Exhaust Fluid) en Estados Unidos, se almacena en un tanque independiente y su inyección se controla electrónicamente adaptándola a los parámetros de funcionamiento del motor (Fig 10).

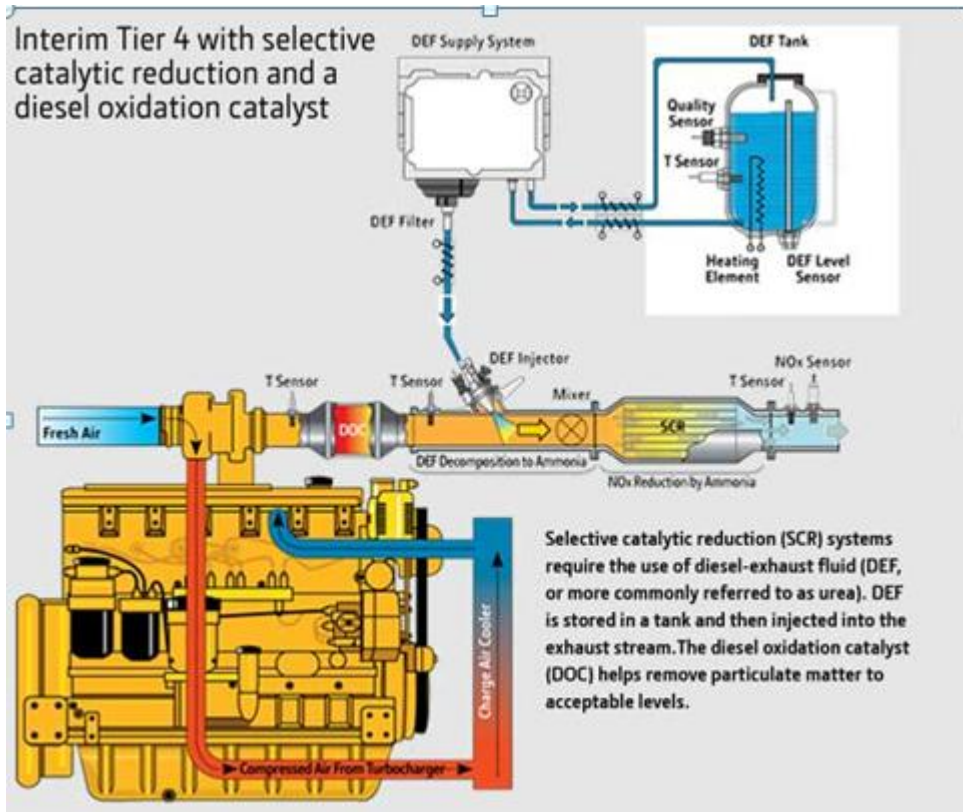


Fig 10. Reductor catalítico selectivo.



Otro avance tecnológico presente en algunos motores es un catalizador de oxidación diesel (DOC) el cual consiste en un recipiente que contiene una estructura similar a un panal de abejas o sustrato (Fig 11). El sustrato tiene una gran superficie que está recubierta con una capa de un catalizador activo, que consiste es una pequeña cantidad de metales preciosos como el platino o paladio bien dispersos. Cuando los gases de escape atraviesan el catalizador, el



monóxido de carbono, los hidrocarburos gaseosos y de fracción orgánica soluble se oxidan, lo que reduce las emisiones nocivas. Aproximadamente un 30% del material particulado corresponde a hidrocarburos líquidos ó fracción orgánica soluble (SOF). Bajo ciertas condiciones el DOC remueve hasta el 80 a 90 %.

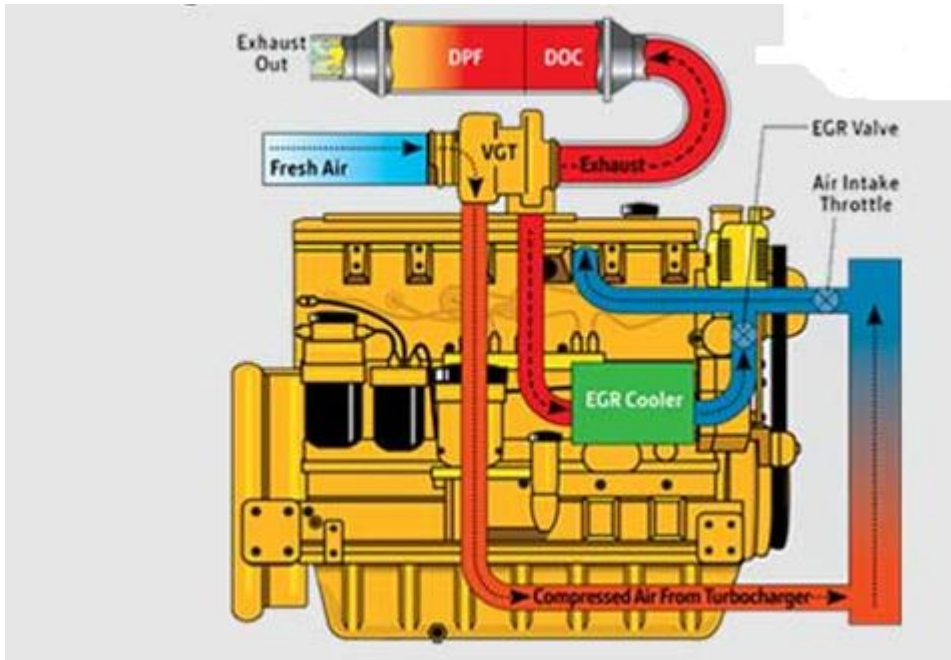
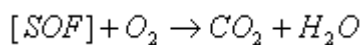
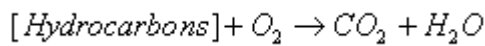


Fig 11 Catalizador de oxidación diesel

El catalizador oxida el monóxido de carbono, los hidrocarburos y la fracción orgánica soluble.



**Curvas Características del Ensayo de un Motor de Regulación Mecánica y Bomba de Inyección.** Consecuencias sobre la prestación de los motores agrícolas de las tres tecnologías modales actuales: *Common Rail* + Regulación Electrónica + Turbosobrealimentación de Aire.

1. Caracterización de la regulación Mecánica sobre motores con circuito convencional con bomba inyectora: Estos motores tenían y siguen teniendo un consumo específico del orden de 320 a 400 gr/kW.h, cuando la Reserva de Par (diferencia porcentual entre el par motor a régimen y el máximo), es

importante como para considerar al motor “Elástico”. En estos sistemas se pagaba cara la reserva de par por una marcada menor eficiencia al régimen nominal, mayoritariamente coincidente con la Potencia Máxima.

2. En cambio la regulación electrónica sobre motores *common rail*, a logrado hacer funcionar a los motores de los tractores en condiciones de ventajas que unos años antes de la difusión de estas tecnologías hubiéramos calificados de ideales o utópicas. Reservas de par motor realmente importantes, del orden de 45 a 55%, pero con consumos específicos del orden de sólo 180 a 240 gr/Kw.h. Siempre incluyendo una “Reserva de Potencia”, pues si bien hasta hoy la directiva de uso del fabricante sigue siendo usarlo a velocidad de régimen, ante una sobrecarga la potencia puede incrementarse un porcentaje significativo, para periodos eventuales de funcionamiento exigido.

En definitiva estas son las diferencias logradas al pasar de regular un motor en base a sólo un parámetro (el régimen), a hacerlo en base a alrededor de una decena de parámetros relevados por la EDU y enviados a la ECU para procesarlos y tomar decisiones sobre las variables sujetas a regulación que garantizan una mejor prestación.

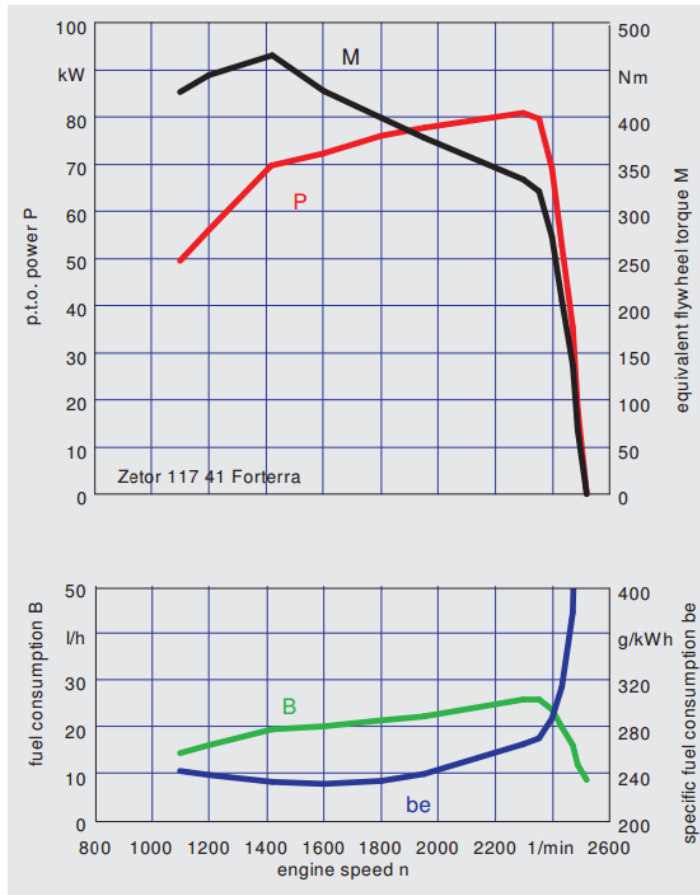
La otra característica de estos nuevos motores es que a la baja del consumo específico, es decir el costo de una unidad de potencia durante una hora, suman la estabilidad de ese valor que se mantiene en un rango muy amplio de funcionamiento, es decir tiene una curva muy “chata”.

### **Las siguientes son curvas características de prestación de dos motores de tractores.**

Fuente DLG de Alemania:

([http://www.dlg-test.de/tests/NewHollandT7\\_315\\_DLG-PowerMix\\_en.pdf](http://www.dlg-test.de/tests/NewHollandT7_315_DLG-PowerMix_en.pdf) ) y ([http://www.dlg-test.de/tests/Fendt-939-Vario-S4\\_en\\_neu.pdf](http://www.dlg-test.de/tests/Fendt-939-Vario-S4_en_neu.pdf)) Ultima entrada 20 marzo 2017.





**Average fuel consumption of**  
the 6 measurement points from the governor curve 17,6 l/h, 348 g/kWh

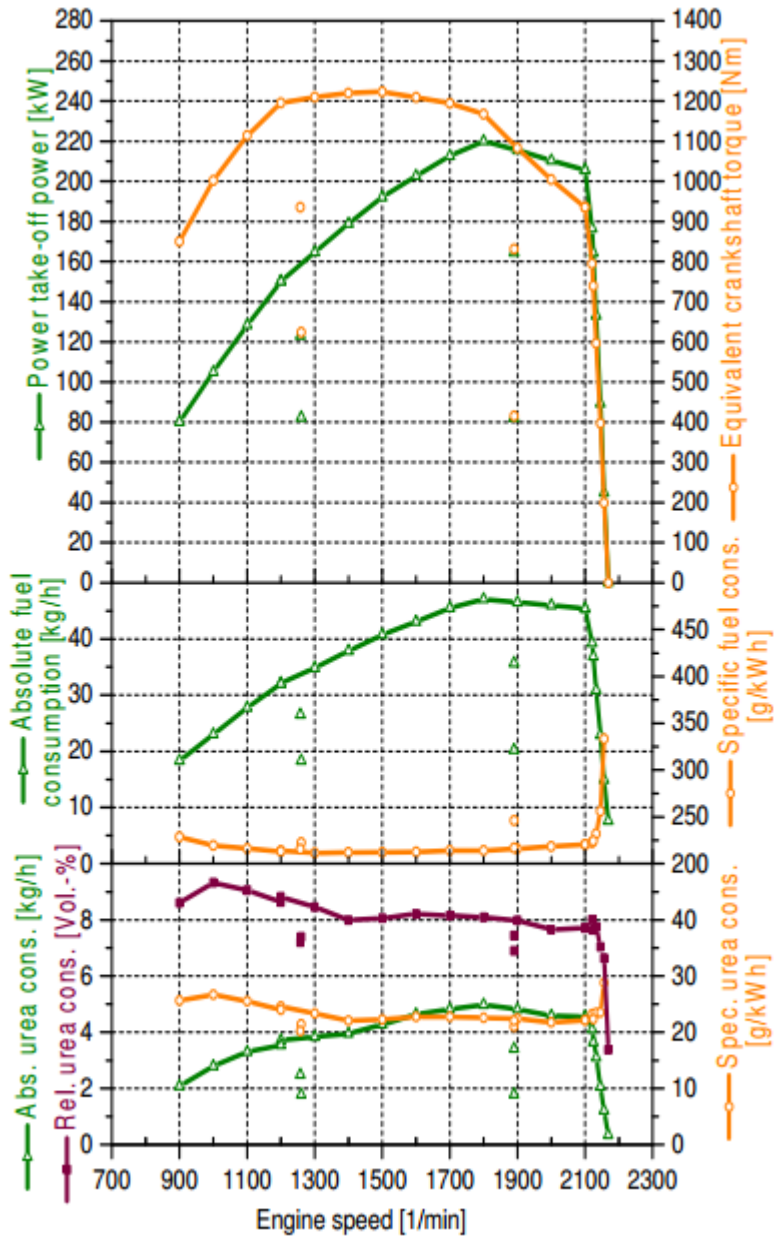
**Equivalent flywheel torque**

Max. torque 469 Nm at 1420  $min^{-1}$ , torque increase 45 % at a speed drop of 40 %

**Torque at engine speed 1000  $min^{-1}$**

- % rated to the torque at rated engine speed

**Zetor 117.41 Ensayo Enero 2003. Motor de regulación mecánica y bomba de inyección. Consumo específico a potencia máxima 348 g/kW.h**



New Holland T7.315. Ensayo octubre 2015. Motor *Common Rail* y Regulación electrónica. Consumo específico a potencia máxima 214 g/kW.h