

MOTORES DIESEL: TECNOLOGÍAS PARA SU FUTURO

Rafael Braun¹, Mario Pumarino¹, Sebastián Tolvett¹
¹Universidad de Chile

RESUMEN

El motor Diesel es la fuente de energía más eficiente del momento, dentro de su escala, se utiliza en gran parte del transporte de mercancías y de personas. Además se utiliza en las industrias para generar electricidad. Sin embargo esta ventaja viene con un precio, contamina. Debido a esto es necesario estudiar a fondo todas las tecnologías disponibles que se puedan aplicar en un motor Diesel para bajar las emisiones.

1 INTRODUCCIÓN

El motor Diesel es la fuente de poder de vehículos de transporte, de generadores de electricidad y de un sin número de máquinas ya sea de faenas de construcción, agrícolas, etc. El liderazgo se lo debe en gran medida a su eficiencia en el consumo de combustible lo que repercute en costos de operación menores que un motor de gasolina comparable. Sin embargo contamina, por lo cual es necesario crear las condiciones para que el impacto medioambiental sea el mínimo posible.

El desarrollo del motor Diesel ha apuntado a obtener mayor potencia por menos combustible. En la actualidad un motor Diesel utiliza solo un 70% del combustible que utilizaría un motor a gasolina de características similares para una misma potencia. Sin embargo la robustez necesaria lo hace más costoso y pesado, además produce menos poder por unidad desplazada que un motor de gasolina. La difusión de la llama de la combustión Diesel es más lenta lo que limita la velocidad máxima de operación.

El motor Diesel y su infraestructura afecta todos los aspectos del medio ambiente, tierra, agua y aire. Los gases de escape contienen los típicos productos de combustión como dióxido de carbono CO₂, hidrógeno, oxígeno, vapor de agua, a su vez monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles (VOCs), alcalenos, hidrocarburos aromáticos, aromáticos poli cíclicos (PAHs), y óxidos de sulfuro (SO_x), compuestos resultantes de una combustión incompleta. Las emisiones de hidrocarburos (HC) y de óxidos nitrosos (NO_x) contribuyen a la formación de smog, y de material particulado. Estudios en California y Viena, Austria, determinaron que los vehículos Diesel que representan solo el 5% del total aportan de un décimo a tres cuartos del material particulado en áreas urbanas.

La producción de motores Diesel y vehículos, y la producción, almacenamiento y distribución del combustible Diesel provocan impactos en el medio ambiente. Por ejemplo los hidrocarburos emitidos por los estanques, refinerías, cañerías, o por filtraciones a la tierra y a las napas subterráneas. Muchos de los químicos como

metales pesados y PATHs tienen una vida larga en el ambiente, debido a su suficientemente alto peso molecular. El mejor rendimiento de los motores Diesel implica que emiten menos CO₂ que los motores a gasolina similares, como el CO₂ es la principal causa del efecto invernadero los motores Diesel aparecían como una alternativa a los vehículos a gasolina. Sin embargo estudios recientes indican que el material particulado altera la cubierta de las nubes y las precipitaciones opacando las ventajas antes mencionadas.

Los impactos en la salud de las emisiones de motores Diesel son importantes, HC y PM han sido identificadas como sustancias tóxicas, PAHs y dióxidos los compuestos más tóxicos dentro de la combustión del petróleo son abundantes en los gases de escape de los motores Diesel, los metales pesados, PATHs, y dioxinas pueden viajar largas distancias como gases o aerosol, y son aparentemente resistentes a la degradación en partículas atmosféricas, como resultado estos contaminantes se encuentran en altas concentraciones en zonas rurales.

El más importante de los efectos en la salud de las emisiones del Diesel es la habilidad de actuar como coadyuvante de las alergias, y por ende posibilitar el asma. A su vez el material particulado esta ligado al cáncer del pulmón. Se realizaron más de 30 estudios que probaron que a exposiciones prolongadas a los gases de escape de un motor Diesel aumentaba en un 40% el riesgo de contraer cáncer del pulmón (ver Tabla 1). Se pueden producir otros tipos de problemas de salud como mutación genética del ADN o cambios estructurales en los cromosomas.

Organización	Datos humanos	Datos animales	Evaluación general
NIOSH (1988)	Limitado	Confirmado	Potencial cancerígeno ocupacional
IARC (1989)	Limitado	Suficiente	Probablemente carcinógeno en humanos
IPCS (1996)	No aplicable	No aplicable	Probablemente carcinógeno en humanos
Proposición de California 65 (1990)	Basado en los descubrimientos IARC	Basado en los descubrimientos IARC	Sabido por el estado que produce cáncer
California EPA (1998)	Evidencia real para su asociación	Cancerización demostrada	Particulado del escape Diesel es un agente tóxico
U.S. EPA (2000)	Fuerte, pero no suficiente para su asociación	Suficiente evidencia animal para la inducción de cáncer de pulmón en ratas	Escape Diesel es un agente cancerígeno humano
U.S. DHHS (2000)	Elevado cáncer de pulmón en grupos expuestos	Soporte de los datos animales y mecánicos	Razonablemente anticipado de ser cancerígeno

Tabla #1: Resumen de los efectos a la salud por parte del Diesel realizado por varias organizaciones

Las normas de emisión y las mejoras en la calidad del combustible lograron reducir en un 75% los niveles anteriores a los controles. Desde 1980 la reducción de las emisiones

de NO_x y de material particulado(PM) es de un 90% con las mejoras hechas a los sistemas de inyección. Las estrategias para controlar los NO_x y el MP son las turbocargadores, el “aftercooling”(post enfriamiento), cambios en los diseños de las cámaras de combustión, atraso de la inyección, e inyección de alta presión.

Se espera que los tratamientos post combustión reduzcan las emisiones aún más, pero estos dispositivos requieren combustibles con contenidos de azufre <15ppmw, o mejor aún <5 ppmw. Reducir el contenido de azufre contribuye directamente a la reducción de las emisiones de SO_x y MP e indirectamente a la reducción de emisiones de NO_x, CO y HCs. Las emisiones de MP fino y benceno son especialmente sensibles al contenido de azufre y reduciendo los aromáticos se reducen las emisiones de NO_x. Con la implementación de las normas del combustible en los años 90, se han obtenidos mejoras significantes en la reducción de emisiones.

Combustibles Diesel alternativos han mostrado una promesa de reducción aún mayor de las emisiones de NO_x y MP. Además de los bajos índices de azufre todos estos combustibles tienen una baja densidad, con niveles mínimos de aromáticos y contenidos de PAH. El combustible Diesel sintético es el más limpio de los combustibles reformulados. Otras alternativas son ARCO's Emisión Control-Diesel (EC-D), Lubrizol's PuriNO_x, y biodiesel (hecho de aceite vegetal y grasas animales).

El gas natural (CNG) y gas natural liquido(LNG) son alternativas al Diesel, los estudios indican que estos tipos de tecnología muestran una gran capacidad de reducir emisiones, sin embargo la limpieza viene con una cuidada mantención e ingeniería de cuidado. El metanol puede ser una opción viable para uso con los futuros vehículos con tecnología de celda de combustible (fuel cell).

La tecnología de celda de combustible que convierte hidrógeno y oxígeno en energía y agua debe remplazar o complementar los motores Diesel esta década. El hidrógeno puede ser producido económicamente por fuentes renovables de energía, como energía eólica, solar, o geotermal. Se puede también producir procesando hidrocarburos, como la gasolina, el Diesel, gas natural, metanol, etanol.

En un futuro cercano se incrementarán los requisitos para poder superar los test de NO_x y MP. La EPA y algunos países estudian el desarrollo de un dinamómetro para la inspección de emisiones para los vehículos de motor Diesel. Las emisiones del futuro se enfocarán un test diseñado para identificar defectos de emisiones debidos al mal mantenimiento y al mal diseño, o baja durabilidad de los sistemas de control systems.

En Estados Unidos, a partir de junio del 2006, las refinerías deben comenzar a producir Diesel con un máximo de 15 ppmw de azufre. En la Unión Europea el limite se fijara en 50 ppmw para el 2005, otros países europeos además de Australia y algunos países asiáticos, reducirán sus niveles de azufre en el Diesel.

País	Regulación o incentivo	Limite Máximo de S	Limite de combustible convencional	Fecha de introducción
EU	EURO2 98/70/EC EURO3 98/70/EC EURO4		500 ppmw (450) 350 ppmw 50 ppmw	Jan 1997 Jan 2000 Jan 2005
Bélgica	Incentivo nacional	50 ppmw	350 ppmw	Oct 2001
Dinamarca	Incentivo nacional	50 ppmw	500 ppmw	June 1999
Finlandia	Incentivo nacional Iniciativa Neste/Fortum	50 ppmw 10 ppmw	350 ppmw	2002
Alemania	Incentivo nacional	50 ppmw 10 ppmw	350 ppmw	Nov 2001 Jan 2003
Holanda	Incentivo nacional	50 ppmw	350 ppmw	Jan 2001
Suecia	Incentivo nacional Incentivo nacional	10 ppmw 10 ppmw 50 ppmw	2000 ppmw 350 ppmw 350 ppmw	1991 2001 2001
Suiza	Incentivo nacional Iniciativa agrícola Iniciativa BP	50/10 ppmw 10 ppmw 10 ppmw	350 ppmw 350 ppmw 350 ppmw	2003 2000 2000
Reino Unido	Incentivo nacional Incentivo nacional	50 ppmw 50 ppmw	500 ppmw 350 ppmw	Marzo 1999 Marzo 2001
Australia	Iniciativa BP de regulación nacional	50 ppmw 50 ppmw	1300 ppmw 500 ppmw	Ene 2006 Fin 2000
Hong Kong	Incentivo nacional "Ultra low sulfur"	50 ppmw	500 ppmw	July 2000
Japón	Propuesta de regulación nacional	50 ppmw	500 ppmw	Antes 2005

Tabla #2. Resumen de las regulaciones y programas de incentivos

En orden de obtener estándares de emisión cada día más óptimos se esperan mejoras en las estrategias de control sumado a la aplicación de dispositivos post combustión, y de la aplicación de tecnologías como recirculación de gases de escape(EGR), inyección controlada, y avanzadas técnicas de combustión.

2 PRINCIPALESTECNOLOGÍAS DISPONIBLES

- Common-rail (riel de conducto común de inyección)
- Sistema electrónico de control
- Turbo de geometría variable
- Inyección directa de alta presión
- Filtro de partícula
- EGR (sistema de recirculación de gases)

En el presente trabajo se abordarán los dos primeros.

3 SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL (EDC)

La utilización de un sistema electrónico de control en motores diesel está motivada por la necesidad de ahorro de combustible y las cada vez más exigentes normas de emisiones. Este sistema debe monitor todas las entradas de sensores en los puntos críticos del motor, calcular parámetros de funcionamiento y controlar las variables del motor para asegurar el funcionamiento en su punto óptimo. Además debe estar totalmente integrado con los otros sistemas electrónicos, como por ejemplo el sistema de frenos, transmisión tracción, etc., para un óptimo desempeño del vehículo. El principal componente del EDC es el módulo de control electrónico o ECM (electronic control module).

3.1 ECM (Módulo de control electrónico)

El ECM está compuesto por una unidad procesadora central, una memoria, software, circuitos integrados y equipos periféricos. Los siguientes son los requerimientos que debe cumplir el ECM para hacerlo competitivo:

Debe controlar los gases de escape midiendo la presión del aire de entrada y la velocidad del motor para limitar la relación aire-combustible.

Debe tener la posibilidad de seleccionar diferentes torques del motor por parte del usuario.

Debe poder controlar el trabajo de cada cilindro para asegurar un funcionamiento suave y constante.

Debe tener la posibilidad de modificar la cantidad de frenado y la velocidad del vehículo a la cual se activa el retardador del motor.

Debe controlar el encendido del ventilador dependiendo de las temperaturas del motor.

Debe controlar la velocidad crucero, manteniendo constante la velocidad de vehículo pudiéndose desconectar con el pedal de freno.

Debe poder reducir la potencia del motor en casos necesarios.

Debe poder apagar el motor en casos necesarios o para ahorrar combustible.

Este sistema debe estar protegido de daños provocados por agua, barro o golpes, por lo que su diseño es muy importante.

3.2 Sensores

Los sensores son los encargados de entregar al ECM la información sobre las condiciones de operación. El ECM se encarga de traducir esta información para poder controlar el motor de buena manera.

3.2.1 Sensor de posición de manivela

Éste es utilizado para calcular la velocidad de motor y programar la inyección de combustible.

3.2.2 Sensor de posición del estrangulador

Generalmente en un potenciómetro colocado en el sistema de pedales de la cabina del vehículo.

3.2.3 Sensores de presión

Típicamente hay tres: turbo boost, de aceite y sensor barométrico. El primero es usado para medir la presión del aire a la entrada para que el ECM mantenga la relación aire-combustible. El sensor de presión de aceite es para evitar algún daño al motor y el barométrico, para el caso en que el motor trabaje a mucha altitud.

3.2.4 Sensores de temperatura

Típicamente hay cuatro: de refrigeración, de aceite, de combustible y de aire. Los sensores de temperatura de agua de refrigeración y de aceite son para evitar daños al motor. El de combustible es para controlar la inyección de mejor manera y el de aire es ocupado para mantener la relación aire-combustible.

3.2.5 Sensores de niveles de fluidos

Existen para el nivel de refrigerante y de aceite. Previenen fallas del motor.

3.2.6 Sensor de velocidad del vehículo

Este sensor permite controlar la velocidad crucero de un vehículo, para que el conductor pueda mantener una velocidad constante sin la necesidad de acelerar con el pedal de la cabina.

3.3 Interconexión y cableado

En general deben ser de materiales que resistan el daño del medioambiente. Además se debe considerar el uso de códigos y colores para una fácil inspección del sistema.

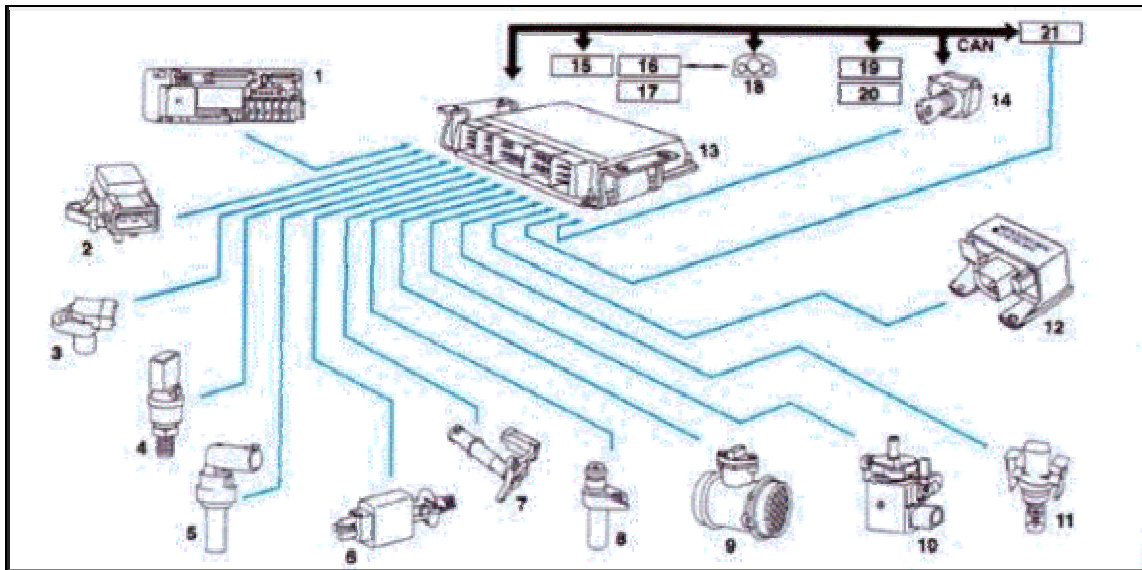


Figura #1 : Diagrama de partes del EDC: 1 Módulo de fusibles y actuadores electrónicos; 2 sensor de presión; 3 sensor de RPM; 4 sensor de presión sobre common-rail; 5 sensor de temperatura de agua; 6 contactor pedal de freno; 7 sensor de nivel de aceite; 8 sensor de posición de cigüeñal; 9 flujómetro de masa de aire (hilo caliente); 10 sensor de posición de pedal de acelerador; 11 sensor de temperatura de aire; 12 precalentador; 13 CPU; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21 información relativa a las señales ABS, EGS, ANTIRROBO, CLIM, ASR.

4 COMMON-RAIL (CONDUCTO COMÚN DE ALIMENTACIÓN DE INYECTORES)

A medida que se desarrollan mayores revoluciones por minuto en los motores de inyección directa, mas de la energía necesaria para la mezcla de combustible con el aire proviene del momento requerido para la atomización del combustible. Este trabajo es realizado por el sistema de inyección (bomba inyectora) que siendo un sistema tradicional, requerirá de cerca de 1 [kW] de energía hidráulica para la generación de 4 inyecciones de 1 [ms] en una revolución de la bomba. Toda esta energía requerida, produce un considerable esfuerzo en el sistema de distribución (del cual depende la bomba inyectora) lo que además tiene como consecuencia sonidos y vibraciones en todo el tren de distribución. Lo anterior unido a la necesidad de un sistema electrónico que se adecue a las condiciones variables tanto del motor como de los requerimientos del usuario, hacen necesario la implementación del Sistema Common Rail (Conducto Común) en los vehículos Diesel modernos.

Este sistema consiste básicamente en una vía “común” que acumula combustible a presión para todos los inyectores. La presión es controlada por una bomba de combustible de alta presión y la inyección controlada en cada pistón se realiza electro magnéticamente en cada inyector. La siguiente figura #2 muestra las partes del sistema y un esquema de posible configuración de estos.

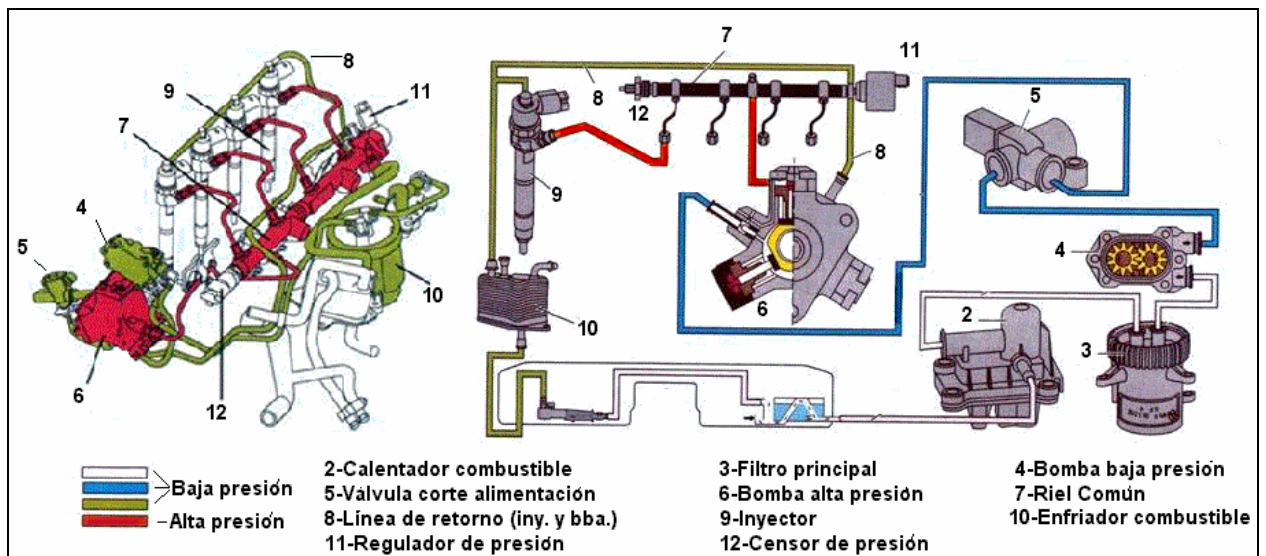


Figura #2 partes de un sistema Common rail

4.1 Ventajas sobre un sistema convencional.

La mayor ventaja que presenta este sistema es la de poder implementar un control electrónico de inyección de combustible. El método tradicional se caracteriza por poseer sistemas mecánicos en su sistema de regulación de inyección, esto hace imposible la implementación de todos los parámetros calculados que puede entregar un sistema electrónico moderno.

Como en el sistema Common rail, el control de la inyección es producido por pulsos de corriente (inyectores controlados electro magnéticamente), un sistema electrónico puede ser implementado y modificar parámetros en la inyección en cualquier momento del ciclo. Esto es posible debido a la independencia que tiene el sistema con las revoluciones del motor, debido a la acumulación de presión combustible en el conducto común que alimenta a todos los inyectores.

4.2 Aplicaciones del sistema Common rail en la mejora de la inyección Diesel

Los turbocargadores de geometría variable instalados en motores de inyección Diesel, necesitan de una máxima presión de inyección de combustible a baja RPM al momento de solicitar una aceleración del motor. Lamentablemente la energía disponible en el sistema de escape es insuficiente para la aceleración del turbo ("Turbo-lag") lo cual retarda su aceleración. En un sistema tradicional, la máxima disponibilidad de presión de combustible depende de las RPM del motor lo cual dificulta la aceleración del turbo en estos momentos. El sistema Common rail al ser independiente del motor, puede disponer de la presión necesaria y suplir la demanda de combustible óptima para la aceleración del sistema (energía para el turbo).

El sistema de control electrónico entrega señales que detectan inconsistencias entre la potencia entregada por cada cilindro, defecto que se puede corregir ya que cada inyector es controlado independientemente.

Con sistemas electrónicos es posible determinar la tasa de inyección de combustible tanto para condiciones de aceleración o de régimen constante de RPM, para mejorar la distorsión en la combustión y las emisiones de HC. En un caso ideal, para controlar la tasa de inyección, debería existir un control total de la apertura del inyector, solución que significaría un alto costo y complejidad técnica. Es aquí donde el sistema Common rail es una alternativa posible, en donde la modulación de la inyección se puede realizar mediante una secuencia de pequeñas inyecciones seguidas (abriendo y cerrando el inyector). Es decir existirá una inyección principal, la que tendrá previas y posteriores inyecciones pequeñas, hecho que dependerá de las condiciones de funcionamiento.

4.3 Descripción de las partes principales del sistema Common rail:

4.3.1 Riel Común (7 en figura #2):

El riel es en sí mismo un tubo de paredes gruesas (para minimizar el peso del depósito de presión) y es requerido para suplir combustible a los inyectores sin una baja de presión significativa, además el conducto actúa como damper de las pulsaciones de cada inyector. Las presiones al interior de este conducto oscilan entre los 20-160 [MPa], por lo que las conexiones deben ser seguras y soportar vibraciones y altas temperaturas. El conducto posee un sensor y controlador de presión que mantiene a ésta en los niveles deseados.

4.3.2 Bomba de alta presión (6 en figura #2):

Estas bombas de alta presión en su mayoría son de tipo de un leva excéntricos el cual mueve a un grupo de seguidores que accionan émbolos radiales. El diseño esta dirigido a una minimización y suavización de torque requerido por la bomba y reducción de ruido. Poseen válvulas de alivio de funcionamiento rápido y preciso que evitan sobrepresiones en el conducto.

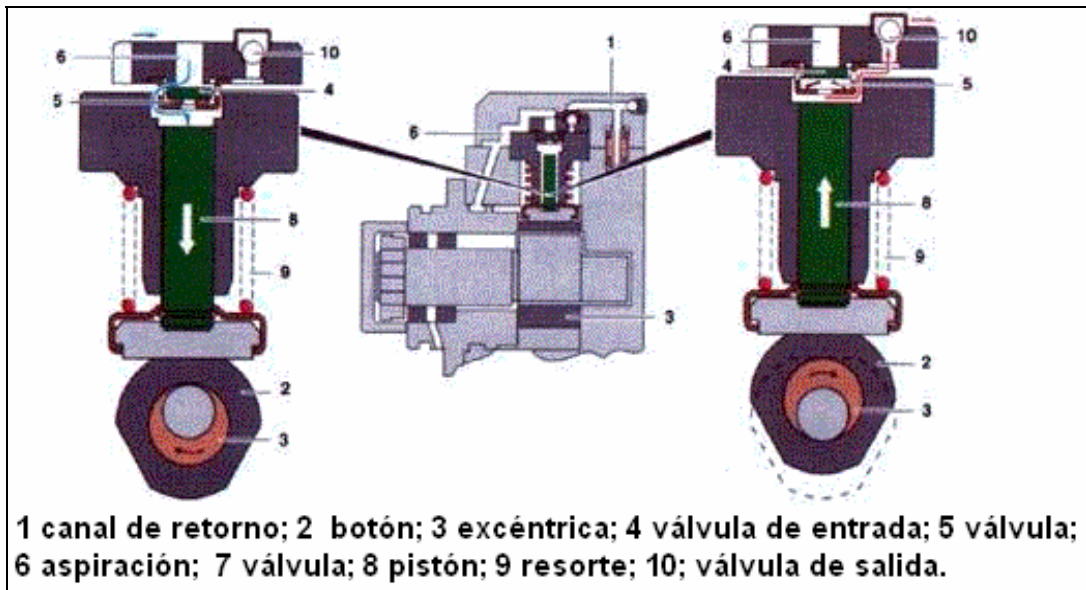


Figura # 3 Bomba de alta presión

4.3.3 Inyector (9 en figura #2):

Cada inyector tiene una válvula de aguja convencional que opera como un servomecanismo ajustando la diferencia de presión que hay entre la parte inferior y superior de la válvula (ver corte de inyector en figura # 5). Un resorte mantiene la aguja cerrada, y sobre ella se encuentra su controlador. Este sistema puede ser operado en cualquier momento del ciclo del motor, pudiendo ejecutar varias inyecciones en un mismo ciclo. Para disminuir la distorsión en la combustión, la cual es notoria en altas tasas de inyección a bajas revoluciones, es que se produce una pre- inyección de combustible antes de la principal. Este caso se puede apreciar en la figura #4.

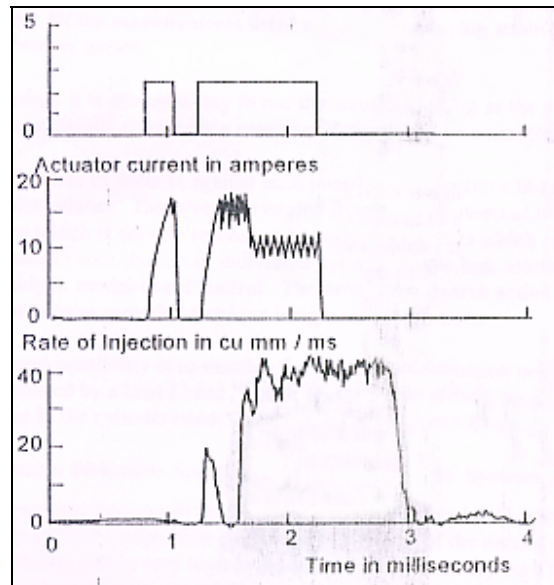


Figura # 4 Pulso guía, corriente y tasa de inyección en inyector alimentado con 160[MPa], con volumen de inyección principal de 52mm³ y 2.5 mm³ de pre-inyección

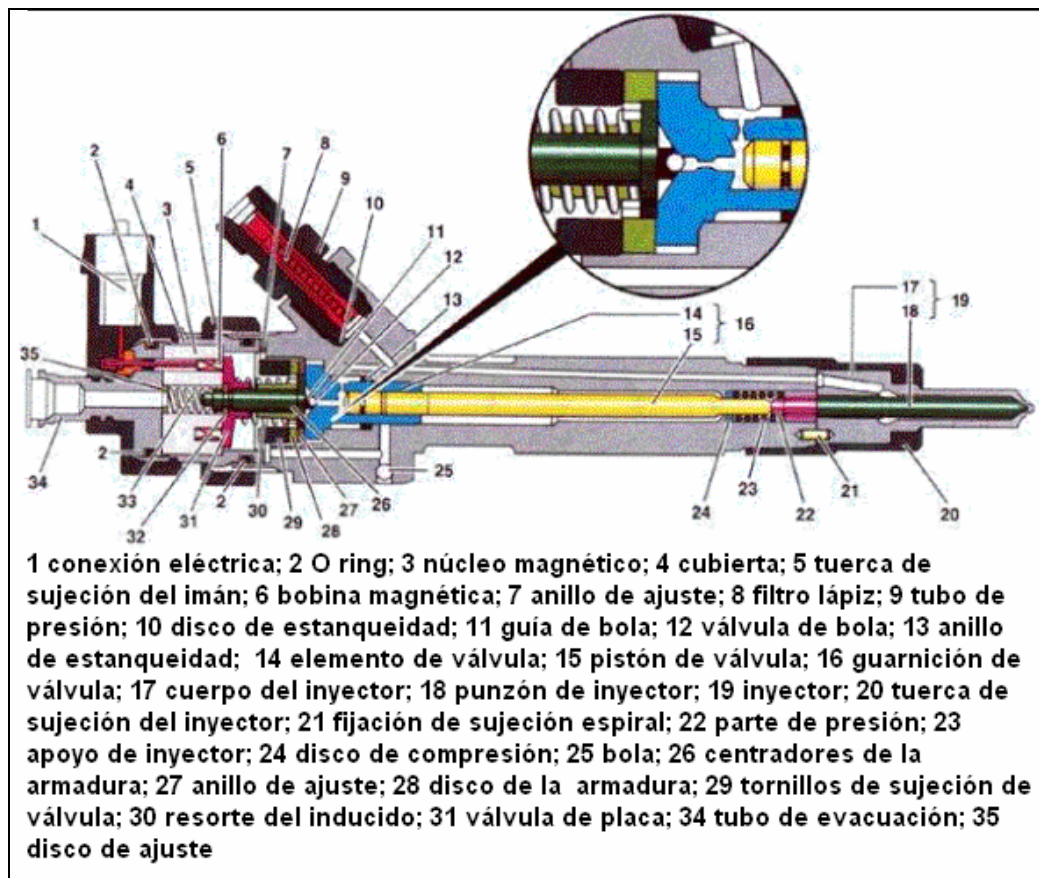


Figura # 5 Corte de un inyector

5 CONCLUSIONES

Las normas de emisión son necesarias para estimular el progreso en la reducción de las emisiones en los vehículos diesel. Estas normas deben basarse en estudios confiables prácticos de implementar. Sin embargo las normas deben apuntar a que se produzcan considerables mejoras en la calidad del aire. Esto sólo se puede lograr si se dispone de combustible con mínimos niveles de azufre lo que permite la utilización de tratamientos postcombustión.

Con el sistema de control electrónico para motores Diesel se logra un funcionamiento más cercano al punto óptimo del motor. Esto permite que el motor funcione en forma más pareja, suave y además emitiendo menos contaminantes, lo que hoy en día es primordial debido a lo visto en la introducción del presente trabajo: las emisiones de los vehículos diesel pueden producir cáncer.

El sistema Common rail tiene como principal ventaja, la posibilidad de aplicar los parámetros calculados por un sistema de control electrónico (EDC). Estas condiciones de inyección calculadas se pueden aplicar en cualquier momento del ciclo debido a la independencia que tiene el sistema Common rail con respecto al régimen del motor. Si bien los inyectores controlados electro magnéticamente no pueden lograr una tasa variable durante la inyección (sistema ideal) se puede lograr una modulación de la tasa de inyección, mediante inyecciones previas y posteriores la principal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Russel M. F., "Diesel Fuel Injection, Common Rail and Control", 1999.
- [2] SAE, "Diesel Engine Reference Book", 1998
- [3] Lloyd, Alan y Cackette, Thomas; "Diesel Engines: Environmental Impact and Control", 2001
- [4] Broge, Jean; "Revving up for Diesel", AEI February 2002

Rafael Braun, Mario Pumarino y Sebastián Tolvett
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Chile, Casilla 2777
Santiago, Chile
Fono: +56 2 6784000
E-mail: rbraun@ing.uchile.cl
mpumarin@ing.uchile.cl
stolvett@vtr.net