



UNIVERSIDAD DE BELGRANO

# Las tesis de Belgrano

Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática

El futuro de los motores de encendido por chispa  
Inyección directa y cámara de combustión  
estratificada

Nº 64

Pablo H. Calchei

Departamento de Investigación  
Junio 2003



## Prólogo

El objetivo de este trabajo es explicar el funcionamiento del sistema de inyección directa electrónica de combustible que trabaja con cargas estratificadas y demostrar sus beneficios.

Hoy en día los diseñadores de motores han cambiado el rumbo del desarrollo de motores de encendido por chispa para hacerlos más eficientes y para que no pierdan terreno frente a los nuevos motores de encendido por compresión y sistema Common-Rail que son el ejemplo a seguir en lo que respecta a eficiencia y emisiones nocivas.

Pensemos que de un litro de petróleo sólo se puede obtener una cierta cantidad de gasoil, por lo tanto, si se promociona tanto el motor Diesel nos encontraremos con desabastecimiento de gasoil.

Debemos fomentar el uso de los motores de encendido por chispa para el transporte personal y dejar los de encendido por compresión para aquellos usos donde la economía es fundamental.

El trabajo se divide en tres partes.

En la primera parte del mismo explico las características y funcionamiento del sistema de inyección directa electrónica de combustible, la cámara de combustión estratificada y la combustión de mezclas pobres, además de mostrar gráficos, dibujos y fotos de motores contemporáneos y del futuro que utilizan este tipo de sistema.

En la segunda parte del trabajo me dispongo a realizar la ardua tarea de demostrar en forma teórica los beneficios que me dá la utilización de este sistema, que son en definitiva menor consumo, más potencia y mejor curva de par. Esto se verá demostrado teóricamente, en la comparación de diversos motores de inyección directa con el motor de mi auto.

Por último, expongo mis conclusiones y espero que este trabajo provoque en ustedes la misma satisfacción que yo recibí cuando lo realizaba.

Pablo Calchei



## Tabla de contenido

<b>CAPITULO I - FORMACIÓN DE LA MEZCLA</b>	
Formación de la mezcla .....	7
Composición del fluido de trabajo .....	7
El aire atmosférico .....	7
Razón estequiométrica .....	8
Combustión de mezclas pobres .....	9
Combustión de mezclas estratificadas .....	9
<b>CAPITULO II - INYECCIÓN DIRECTA</b>	
Inyección directa.....	10
Funcionamiento .....	12
<b>CAPITULO III - ENCENDIDO</b>	
Encendido .....	19
Encendido por plasma .....	20
<b>CAPITULO IV - LAS EMISIONES CONTAMINANTES</b>	
Las emisiones del motor de encendido por chispa .....	22
Influencia de la relación aire-combustible en la emisión de contaminantes .....	22
Óxidos de Nitrógeno .....	23
Catalizador de acumulación .....	23
Catalizador DeNox .....	25
<b>CAPITULO V - MOTORES SOBREALIMENTADOS</b>	
Motores sobrealimentados .....	26
Sobrealimentación por turbina de escape .....	28
<b>CAPITULO VI - MOTORES REALES Y DEL FUTURO</b>	
Motores de inyección directa electrónica multipunto.....	30
Motores del futuro .....	37
<b>CAPITULO VII - DEMOSTRACIÓN TEÓRICA</b>	
Análisis de la programación .....	39
Resultados obtenidos .....	40
<b>CAPITULO VIII - CONCLUSIONES</b>	
Conclusiones .....	41
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
Bibliografía .....	42



## Capítulo I - Formación de la mezcla

El combustible necesita de oxígeno para realizar la combustión. El proceso de formación de la mezcla tiene el trabajo de formar una mezcla, antes o durante la combustión, encendible y homogénea, que se queme por completo. Para realizar la combustión completa, en donde el combustible y el oxígeno se transforme por completo en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, existen dos causas fundamentales:

- Transformación de toda la energía química del combustible en calor.
- Pureza de los gases de escape, sin CO, HC y sin hollín.

Una combustión completa solo se puede realizar cuando la relación de aire-combustible  $\lambda \geq 1$  (el cociente  $\lambda$  es el verdadero valor de la relación aire-combustible y el estequiométrico); por ese motivo cuando se hace trabajar al motor de encendido por chispa con cargas bajas, se tiene que usar cámaras de combustión estratificadas para lograr cerca de la bujía mezclas ricas, o sea encendibles.

### Composición del fluido de trabajo

La energía química contenida en el combustible se libera bajo forma de calor cuando el combustible se quema gracias a la presencia del oxígeno del aire. Es por lo tanto necesario introducir en el motor aire y combustible, al mismo tiempo.

Si el combustible fuese exclusivamente un compuesto de hidrocarburos y la combustión fuese completa, la mezcla comprimida en la cámara de combustión se transformaría al quemarse en vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>). El nitrógeno, gas inerte presente en el aire, no participa en la combustión. El vapor de agua producido por la combustión se mantiene sobre la temperatura crítica y se comporta como un gas permanente. En la práctica los hidrocarburos no son puros, la combustión no es completa y entre los productos de la combustión se encuentran también partes alícuotas de otros gases, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y también oxígeno (O<sub>2</sub>) y diferentes impurezas.

El fluido de trabajo está por lo tanto formado inicialmente por el aire y el combustible y después por los gases producto de la combustión. Su composición química varía así durante el ciclo operativo.

### El aire atmosférico

Una masa de aire atmosférico seco está, en forma aproximada, compuesta por 77 partes de nitrógeno y 23 partes de oxígeno. Contiene también pequeñas cantidades de otros gases, pero éstos se comportan en la combustión como gases inertes y pueden ser considerados desde el punto de vista de los motores como nitrógeno.

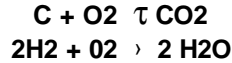
Las proporciones en volumen son: 21 por ciento para el oxígeno, 79 por ciento para el nitrógeno y los demás gases.

La masa de 1 m<sup>3</sup> de aire a la presión de 1 bar (760 mm Hg), es decir a la presión atmosférica normal y a la temperatura de 273,16 °K (0°C), es de 1,275 kg. Un kilogramo de aire a la presión atmosférica y a la temperatura de 273,16 °K ocupa un volumen de 0,77351 m<sup>3</sup>. La tabla siguiente se refiere a la composición del aire:

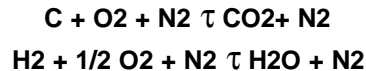
	Masa molecular	Proporción en volumen	Masa relativa
Oxígeno O <sub>2</sub>	32	0,2099	6,717
Nitrógeno N <sub>2</sub>	28	0,7803	21,861
Anhidrido carbónico	44	0,0003	0,013
Otros gases	40	0,0095	0,376
Aire (total)	—	1,0000	28,970

**Cantidad de aire necesaria para la combustión. Razón estequiométrica**

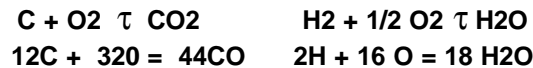
Los combustibles más usados en los motores endotérmicos son mezclas de hidrocarburos, es decir, están compuestos esencialmente por carbono e hidrógeno. El carbono y el hidrógeno reaccionan con el oxígeno según las siguientes ecuaciones elementales:



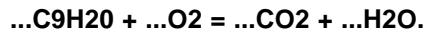
CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O son productos de la combustión. En nuestro caso el comburente es el aire: por lo tanto la combustión se produce en presencia del nitrógeno que forma parte del aire, por lo que las ecuaciones arriba consideradas se transforman en:



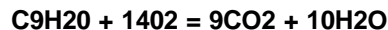
Los productos de la combustión son por lo tanto anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>, agua H<sub>2</sub>O y nitrógeno N<sub>2</sub> si se desprecian los otros gases presentes en el aire y si se considera la combustión como teóricamente completa. De las ecuaciones de la reacción eliminamos N<sub>2</sub> que aparece en igual medida en ambos términos y damos a cada componente el valor en masa teniendo en cuenta que la masa atómica para el hidrógeno es = 1, para el carbono = 12 y para el oxígeno = 16. Se obtiene:



Apliquemos estas ecuaciones al caso de la combustión de un hidrocarburo escogido entre los principales componentes de la gasolina: el nonano. Su fórmula es C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>. Combinándose con el oxígeno produce CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, mientras el nitrógeno N<sub>2</sub> permanece inerte. Escribamos la ecuación de la reacción en forma genérica:



En la ecuación el número de átomos ha de ser igual para ambos términos, y teniendo esto en cuenta se tiene:



Multiplicando el número de los átomos de cada constituyente por la respectiva masa atómica se tiene:

$$\begin{aligned} & [9 \times 12 (\text{C}_9) + 20 (\text{H}_{20})] + [14 \times 32 (\text{O}_2)] \\ &= [9 \times 12(\text{C}) + 9 \times 32(\text{O}_2)] + [10 \times 2(\text{H}_2) + 10 \times 16(\text{O})] \\ 128 \text{ kg C}_9\text{H}_{20} + 448 \text{ kg O}_2 &= 396 \text{ kg CO}_2 + 180 \text{ kg H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Para un kg de nonano (dividiendo por 128 todos los términos): 1 kg de nonano + 3,5 kg de oxígeno = 3,094 kg de CO<sub>2</sub> + 1,406 kg de agua

Por lo tanto para la combustión de 1 kg de nonano se necesitan 3,5 kg de oxígeno y como el oxígeno está proporcionado por el aire, que contiene un 23 % de oxígeno, se necesita una masa de aire de:

$$3,5/0,23=15,2 \text{ kg}$$

En conclusión, la masa de aire necesaria para la combustión completa de 1 kg de nonano es de 15,2 kg. Este valor corresponde a la razón entre las masas de aire y de combustible, llamada estequiométrica, que representa la dosis teórica ideal para obtener la combustión completa. La razón estequiométrica varía poco para los diferentes hidrocarburos. En la práctica en los motores la razón aire-combustible, que llamaremos también proporción o razón de mezcla, se aparta, durante el funcionamiento, del valor estequiométrico: cuando hay defecto de aire, se dice que la mezcla es rica; cuando hay exceso de aire, la mezcla es pobre.



### **Combustión de mezclas pobres**

El empleo de mezclas pobres se enfrenta con el grave problema de una combustión defectuosa. Esta puede ser producida fundamentalmente por las siguientes circunstancias:

- Una velocidad de combustión muy baja.
- La ausencia de la llama.
- Una combustión en la que el frente de llama se extingue sin haber completado su recorrido.

Quiero indicar la marcada influencia que sobre el correcto funcionamiento del motor con mezcla pobre tienen, entre otros, los siguientes factores:

- El sistema de formación de mezcla.
- El sistema de encendido.
- La turbulencia.
- El punto de encendido.

La turbulencia tiene un efecto importante sobre la combustión de mezclas pobres, no solo porque acelera el proceso de combustión, sino también porque homogeneiza la mezcla. Todos los intentos llevados a cabo para el empleo de mezclas pobres llevan asociada la utilización de una turbulencia elevada.

### **Combustión de mezclas estratificadas**

En los procesos de combustión hasta ahora considerados, el frente de llama se propaga en una mezcla prácticamente homogénea de aire y combustible.

La estratificación de la mezcla, es decir el empleo de mezclas heterogéneas, tuvo en un principio como finalidad reducir la tendencia a la detonación. La mezcla base de admisión, que es muy pobre y por lo tanto resistente a la detonación, se enriquece localmente en la zona de la bujía, resultando una mezcla pobre para el conjunto del proceso.

Las buenas cualidades que presentan estas cámaras en relación con las emisiones de escape, en especial de NO<sub>x</sub> y CO, y sobre todo el consumo específico, ha acelerado la investigación sobre este tipo de cámaras en la última década, aunque las empleadas hasta ahora comercialmente han sido muy escasas.

Las dificultades que presenta la propagación de la llama, ya iniciada en la zona de mezcla rica, al resto de la cámara de combustión se reducen elevando fuertemente la turbulencia.

## Capítulo II - Inyección directa

Antes de la primera guerra mundial había motores de aviones con inyección en el múltiple de admisión. El comienzo de la inyección directa en el cilindro data de 1930. Los bancos de desarrollo fueron los motores de aviones.

Para la inyección se usaron en el comienzo bombas de motores diesel. El combustible era inyectado a través de inyectores al comienzo de la aspiración, pero de forma perpendicular al flujo de aire, como se ve en la figura 1.

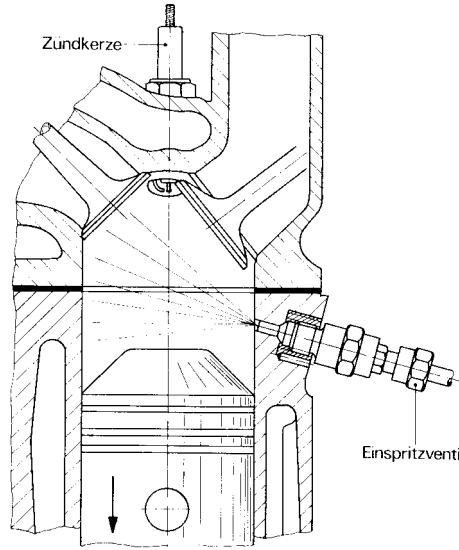


Fig. 1

La ganancia de potencia respecto al motor con carburador es de un máximo de 17% con una baja del consumo de combustible.

En 1937 comenzó la construcción en serie del primer motor para avión con inyección directa de combustible y fueron utilizados por los aviones importantes hasta que terminó la Segunda Guerra Mundial.

Recién en 1949, después de la guerra, retornaron los desarrollos. Un ejemplo de ello lo representa el famoso Mercedes Benz 300 SL, más conocido como ala de gaviota.

También se hicieron ensayos con cargas estratificadas. En este caso el inyector está dirigido de tal manera que produce una mezcla fácil de encender (rica) cerca de la bujía y una mezcla pobre en el resto de la cámara de combustión. Estos desarrollos permitieron trabajar al motor con cargas muy bajas sin problemas de que no encendiera la mezcla (Fig. 2).

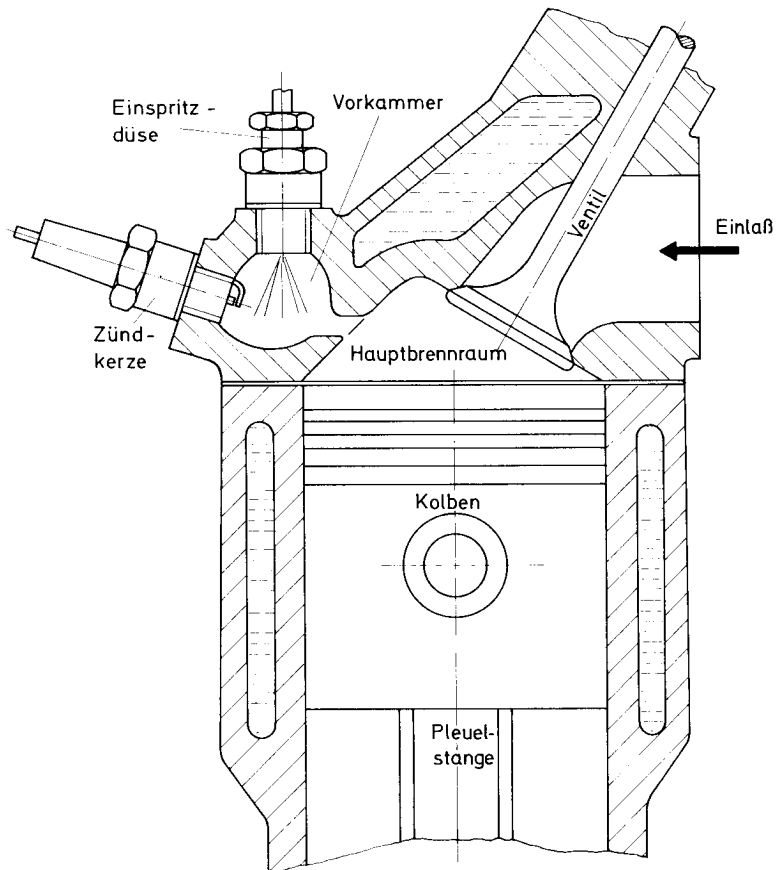


Fig. 2

Al diseñar una cámara de combustión se debe tener también en cuenta la dinámica del fluido que entra porque de ésta depende que los electrodos de la bujía se encuentren rodeados, cuando descarga la chispa, de una mezcla pobre o rica. Naturalmente las condiciones cambian según la carga sea homogénea o estratificada.

Cuando el combustible es introducido por inyección directamente a la cámara de combustión, la carga generalmente no es homogénea, sino que está formada por estratos que tienen diferente relación aire-gasolina. Si se consigue que la chispa esté rodeada por un estrato de mezcla rica, se puede reducir el consumo haciendo funcionar el motor con una carga medianamente pobre. Con este fin se han ideado las llamadas cámaras de carga estratificada, en las cuales la bujía está dispuesta de modo que la chispa salte en la zona en la cual la relación aire-combustible es siempre tal que se asegure el encendido.

Desde que las normas anticontaminación se han hecho más severas y más preocupante es la progresiva escasez del petróleo, las investigaciones se han orientado hacia el estudio de soluciones que permitan quemar cargas con relación aire / combustible tan alta como fuera posible, a semejanza de lo que ocurre en los motores de encendido por compresión. No pocos fabricantes, especialmente los japoneses, han propuesto cámaras de combustión llamadas de carga estratificada, que funcionan según el principio al que hemos aludido en el párrafo anterior.

Con la cámara de carga estratificada se logra una mezcla rica y fácil de encender cerca de la bujía ( $\lambda=0,6$  a  $\lambda=0,9$ ) y una mezcla pobre en el resto de la cámara. Por lo tanto el motor puede trabajar con relaciones aire-combustible pobres ( $\lambda > 3$ ) sin que se presente problemas de no encendido. Mezclas homogéneas con valores de A / C mayores de  $\lambda=1.47$  no encienden.

Actualmente los motores modernos con inyección directa electrónica y cargas estratificadas trabajan con una presión de inyección de 100 a 125 bar.

Las ventajas que brinda la inyección directa electrónica que trabaja con cargas estratificadas son las siguientes:

- 1) Mejor refrigeración interna del cilindro debido a la evaporación de las gotas de combustible; el llenado del cilindro es mejor, y los límites de la detonación del motor son elevados hacia una mayor elevación de la relación de compresión (14:1 a 15:1).
- 2) Debido a que elementos que entorpecen el flujo del aire, por ejemplo la mariposa del múltiple de admisión, no son necesarios cuando el reglaje de las válvulas es electrónico, aumenta el llenado del cilindro y el rendimiento volumétrico no depende del estado de carga.
- 3) El motor puede trabajar con cargas estratificadas, esto quiere decir que los chorros de combustible pueden ser dirigidos de manera tal que cerca de la bujía se ubique una mezcla de aire-combustible fácil de encender ( $\lambda=1$ ), y en el resto de la cámara de combustión se ubique una mezcla pobre.
- 4) No es necesario controlar el caudal del aire, salvo contadas excepciones.
- 5) El múltiple de admisión puede tomar la forma más adecuada para lograr el mejor llenado del cilindro.
- 6) Cada cilindro recibe la misma cantidad de aire (llenado parejo).
- 7) Menor consumo, más par y mayor potencia debido al aumento de la relación de compresión y a que el ciclo indicado no depende del estado de carga.
- 8) Rendimiento volumétrico no depende del estado de carga.
- 9) Disminuye la pérdida de calor en la expansión porque en las paredes del cilindro se encuentra solo aire que funciona como aislante.
- 10) Óptima regulación de la cantidad de combustible para cada estado de carga y revoluciones.
- 11) Disminuye la detonación porque la cámara de combustión se construye de tal forma que la zona con la carga rica y la bujía se encuentren alejadas de las zonas "calientes" del motor (Ej.: las válvulas de escape), y porque se inyecta el combustible frío sobre la cabeza del pistón que tiene como fin enfriarlo.

El ahorro de combustible se produce casi en su totalidad cuando el motor funciona a bajas cargas, debido a que en tal momento al no haber restricciones de caudal producida por la mariposa (lo que produce una depresión en el cilindro), el ciclo empieza a una mayor presión (sube el ciclo en el gráfico P / V) y el rendimiento es mayor. También se produce un ahorro de combustible debido al aumento de la relación de compresión, pero en menor relación.

#### **Desventajas:**

- 1) La ubicación del inyector complica la construcción del motor.
- 2) Al trabajar a altas presiones, de 100 a 125 bar, hay un desgaste de la bomba y del inyector por tal motivo tiene que ser construido con materiales de alta calidad y mayor precio.
- 3) Mayor costo en comparación con la inyección indirecta.
- 4) Alto costo de reparación.
- 5) Problemas para tratar la emisión de NOx.

- 6) Combustión más lenta.
- 7) Forma complicada de la cabeza del pistón que no favorece la propagación de la llama.
- 8) Sistema para tratar los gases de la combustión más caro que los sistemas convencionales.
- 9) Combustible más caro, porque se reduce drásticamente el contenido de azufre, para que pueda funcionar el catalizador por mucho tiempo.

### Funcionamiento

La inyección directa en comparación con la inyección indirecta logra una reducción de consumo de combustible de 10 al 20 % y una ganancia de potencia del 10 %.

En la inyección directa el combustible es inyectado a través de un inyector-válvula electromagnético (Fig. 3), ubicado en la tapa de cilindro, directo al pistón. La mezcla depende de la carga, es decir del momento (brazo palanca). Por eso el motor trabaja a media carga con carga estratificada y en carga completa con mezcla homogénea.



Fig. 3

**Inyector de la firma Denso. Primer inyector con tobera ranurada para pulverizadores con formato de ventilador (fan-shaped sprays). Incluye un chip adherido al diafragma metálico, de forma que no esta expuesto directamente a la presión del combustible.**

En la carga estratificada, el combustible es inyectado durante la compresión poco antes del salto de la chispa de la bujía (Fig.4). Debido a la forma constructiva del conducto de admisión y de la superficie del pistón (Fig.5) se produce un movimiento del aire aspirado que junto con la inyección del combustible logra una mezcla muy encendible cerca de la bujía ( $\lambda = 0,9$ ).

A medida que nos alejamos de la bujía la mezcla es cada vez más pobre.

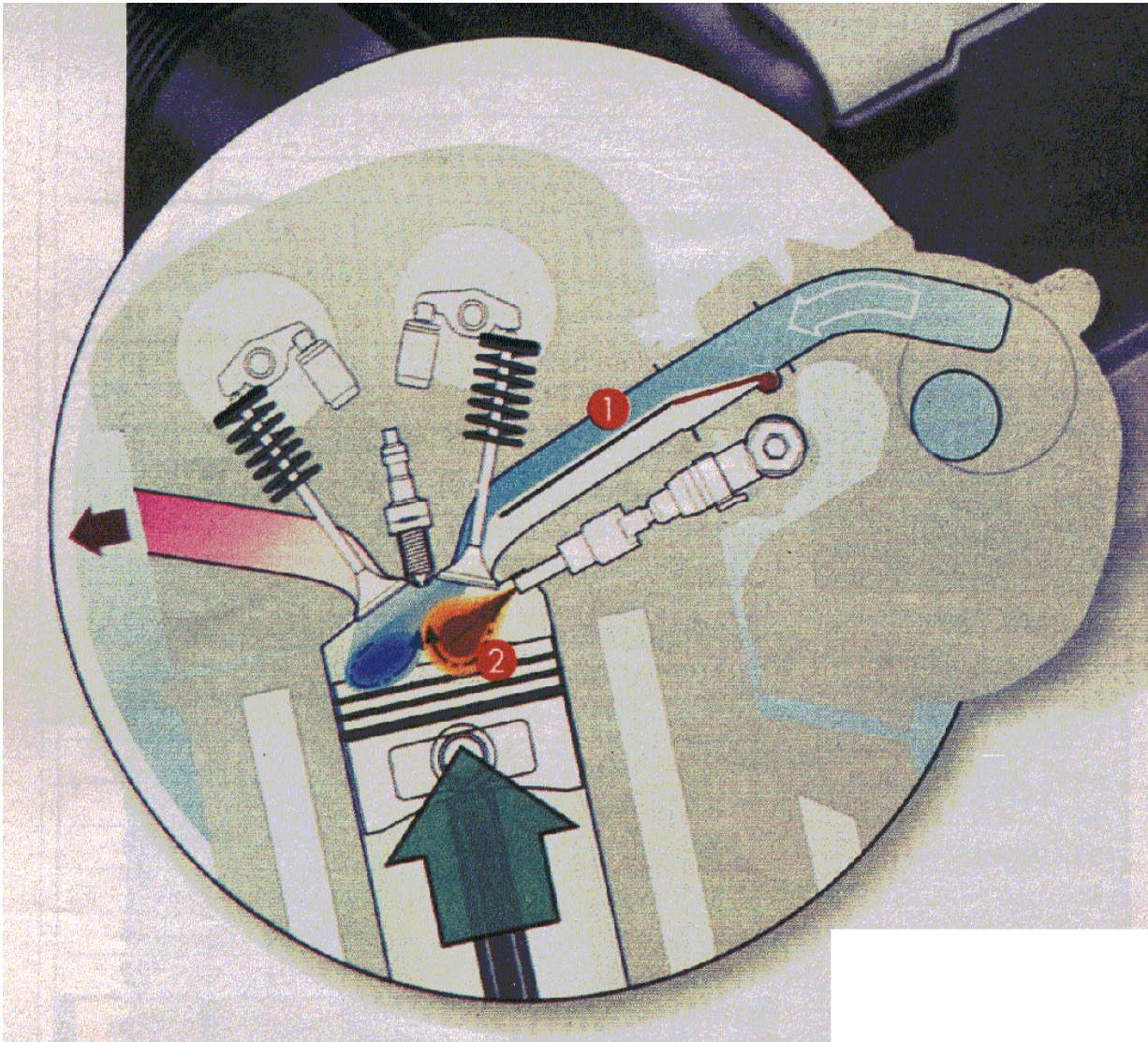


Fig. 4

Pueden encender mezclas con razón de  $A / C$  de hasta 50:1 ( $\lambda > 3$ ) sin problemas. La regulación de la carga se logra como en los motores diesel, con la mariposa totalmente abierta, a través de la cantidad de combustible inyectado. A medida que aumenta la carga del motor, aumenta la cantidad de combustible a inyectar. Por eso decrece la relación  $A / C$ , hasta que se llega a  $\lambda = 1,5$ , lo que produce hollín (humos en el escape). Para reducir esto el motor tiene que trabajar con la relación estequiométrica ( $A / C = 1$ ), o sea una mezcla homogénea.

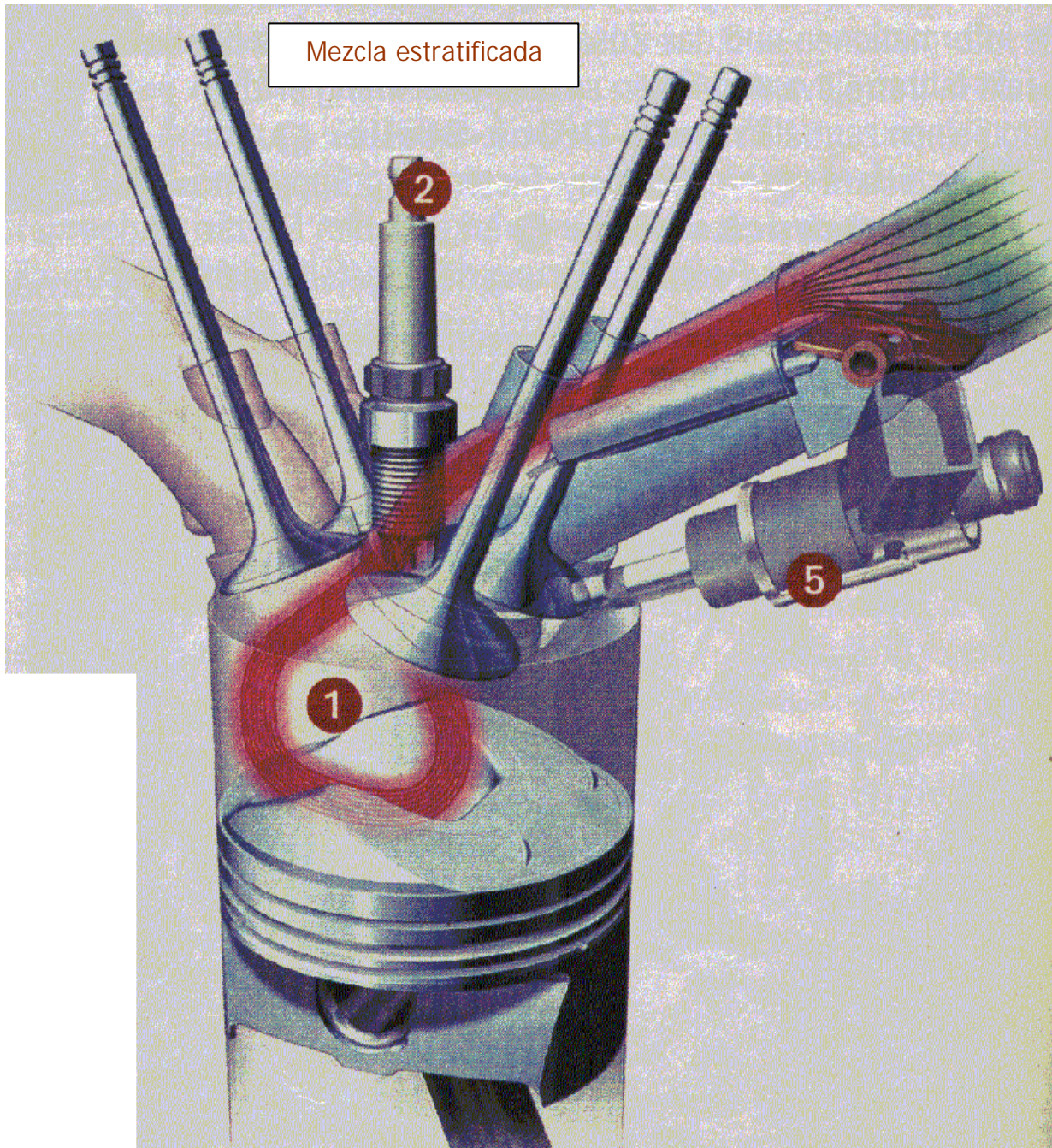


Fig. 5

Tanto en la figura 4 como en la 5 se observa como se logra estratificar la carga con la geometría del pistón y del múltiple de admisión.

Con una mezcla homogénea el combustible está repartido en toda la cámara de combustión por igual. Por eso el combustible es inyectado muy temprano, durante la fase de aspiración (Fig.6 y 7). Con lo cual queda bastante tiempo para que se mezcle de forma homogénea el combustible. Para controlar la carga se utiliza en este momento el mismo método que en la inyección indirecta, que es la mariposa.

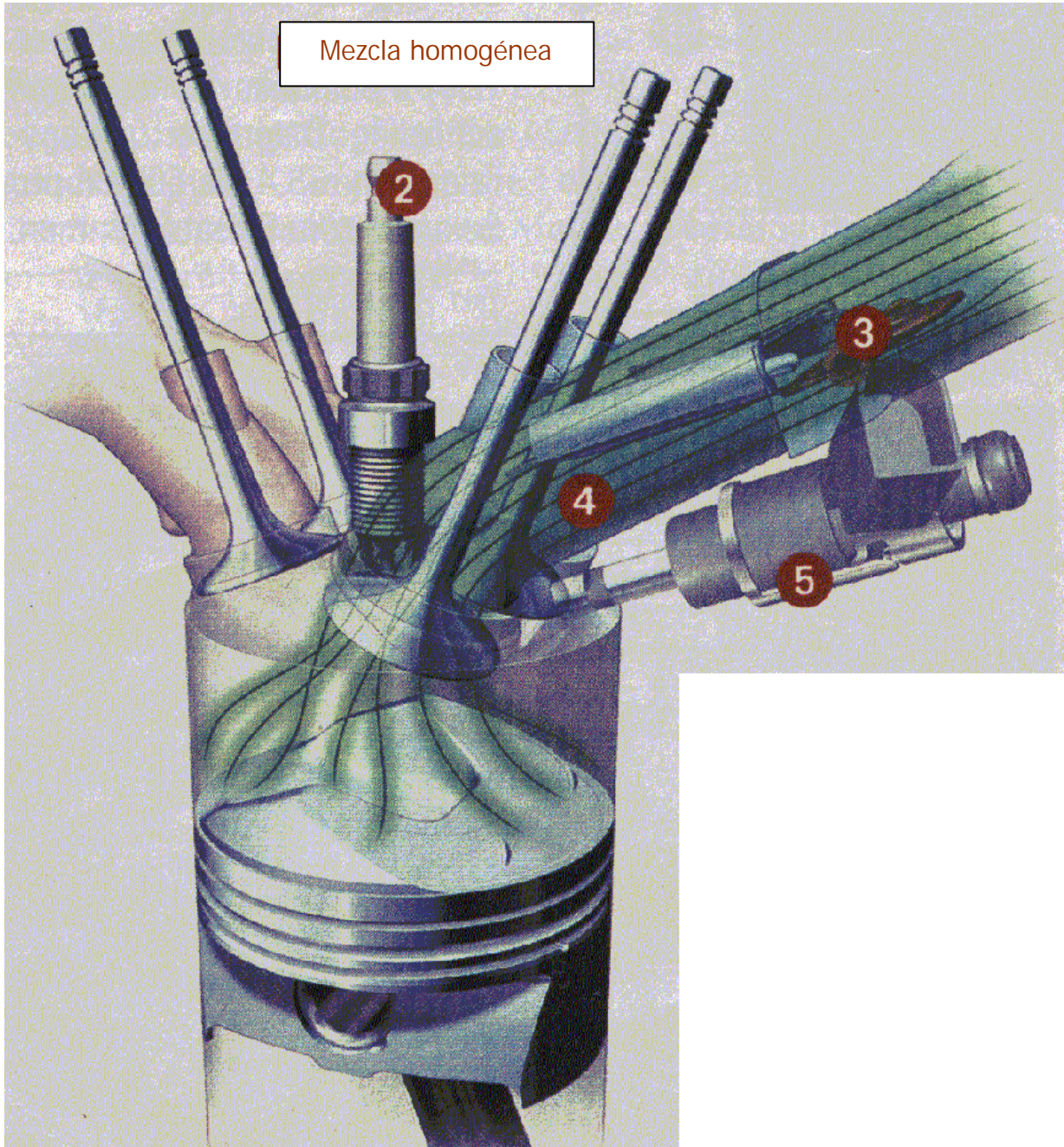


Fig. 6

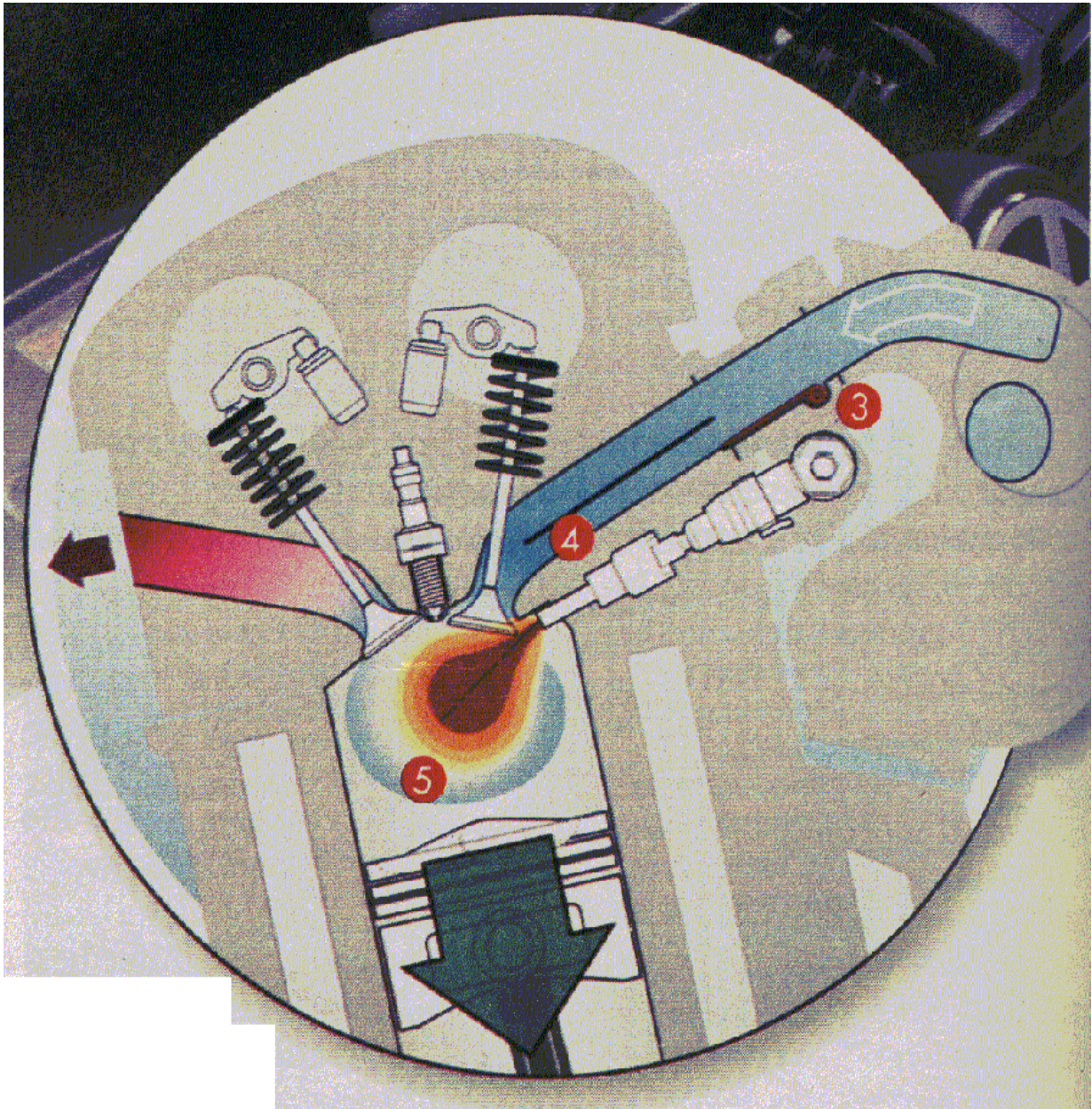


Fig. 7

**En esta figura se puede apreciar que el chorro de la inyección es casi perpendicular a la entrada de aire para que se distribuya mejor el combustible con el aire.**

La mariposa no puede ser manejada en forma mecánica por el pedal del acelerador porque durante la carga estratificada tiene que estar totalmente abierta y recién con la carga homogénea se tiene que mover. Por esta razón la mariposa es controlada por un motor eléctrico. Ésta recibe la orden de un ordenador, una computadora. En este caso se habla de un pedal eléctrico.

En la actualidad se están desarrollando sistemas de distribución completamente variables (figura 8 y 9). El empleo de esta tecnología permitiría que la distribución de las válvulas fuese totalmente ajustable para variar las masas de aire que entra y de los gases residuales, evitando pérdidas por la mariposa a régimen de carga parcial.



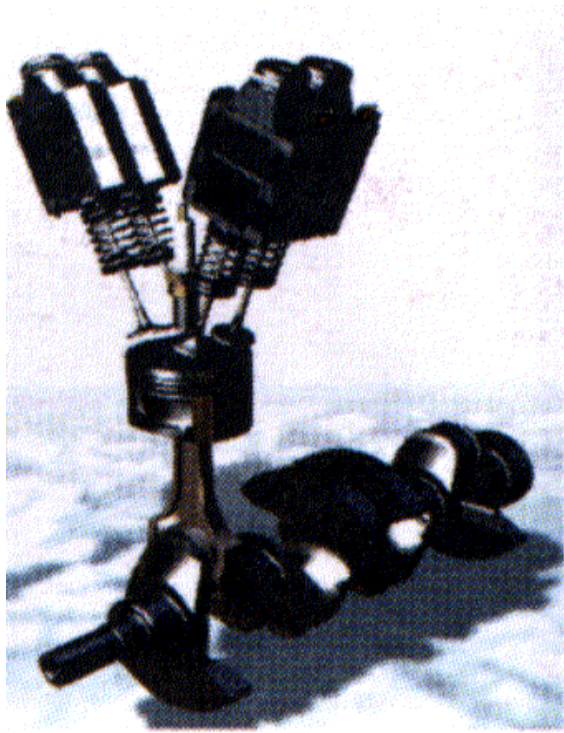


Fig. 8

Para poder utilizar los electroimanes, es necesaria una gran cantidad de energía que el alternador común es incapaz de producir. Por tal motivo se recurre al sistema de generador-arranque en el volante del motor con batería e instalación eléct. de 12-42V.

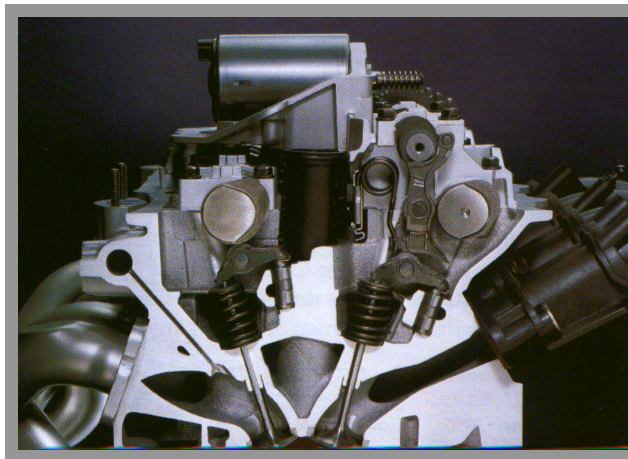


Fig. 9

El problema de este sistema se encuentra cuando se van a tratar las emisiones. Como el motor trabaja la mayor parte del tiempo con cargas estratificadas, tengo en exceso en la cámara de combustión, por ende exceso de aire en el escape y poco CO y HC, lo cual me hace imposible tratar los Nox con catalizadores de tres vías comunes. Por eso se necesitan catalizadores especiales para transformar el Nox en NO<sub>2</sub>. Para este caso se pueden utilizar los catalizadores de acumulación o Denox que voy a explicar más tarde. Con la inyección directa electrónica puedo realizar una post-inyección que ayuda y simplifica el trabajo de los catalizadores antes mencionados.

Por último la inyección de combustible se produce a través de una válvula-inyector electromagnética que está conectada en forma directa a un colector-acumulador de combustible (common-rail, Fig.10). Para la medición de la cantidad de combustible (tiempo de inyección) y del punto de inyección se recurre a la ayuda de una centralita computarizada.

El combustible es conducido desde el tanque por una bomba primaria, que trabaja a tres bar, hasta la bomba de alta presión. Ésta última bomba bombea el combustible acumulado en el colector. La presión en el colector puede llegar a los 125 bar.

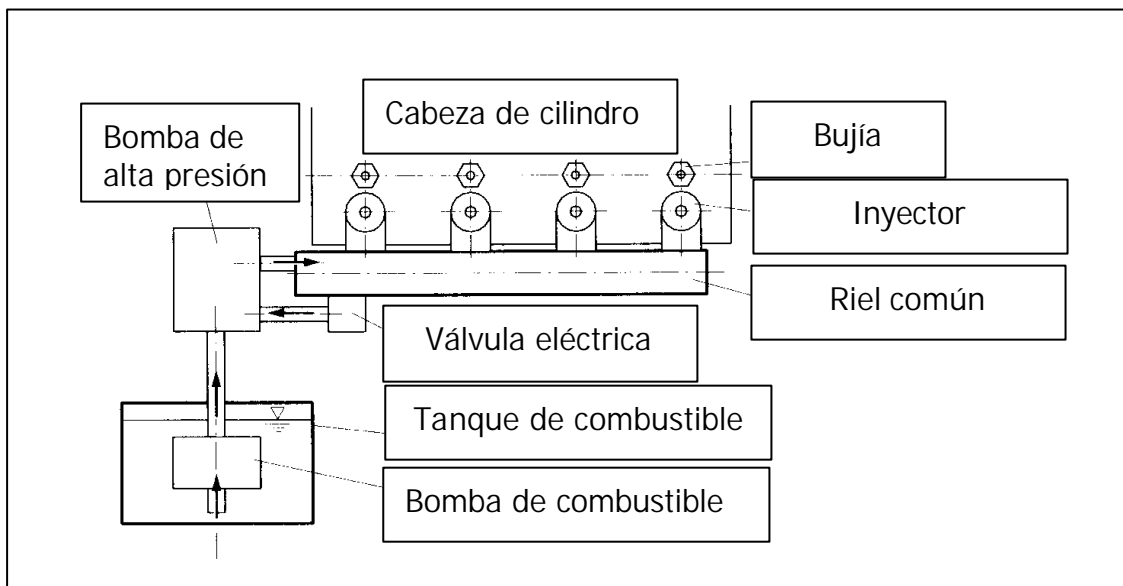


Fig. 10

## Capítulo III - Encendido

En el ciclo Otto teórico se supone que la combustión se realiza a volumen constante, es decir, que es instantánea; en el ciclo real, en cambio, se requiere un cierto espacio de tiempo. Si el encendido tuviera lugar coincidiendo con el P. M. S., la combustión tendría lugar mientras el pistón se va alejando del P. M. S. y el valor de la presión sería inferior al previsto con la consiguiente pérdida de trabajo útil. Por esto conviene anticipar el encendido de modo que la combustión pueda llevarse a cabo en su mayor parte cuando el pistón se encuentra en las cercanías del P. M. S..

Esto produce un redondeamiento de la línea teórica de aportación de calor, y por lo tanto una pérdida de trabajo útil, pero esta pérdida resulta de magnitud mucho menor que la que se tendría sin adelanto del encendido. Cuanto mayor sea el ángulo girado por el cigüeñal entre el momento de ignición y el fin de la combustión, mayor será la pérdida.

Si bien la interpretación de diagramas indicados con excesivo tiempo de combustión es relativamente simple, su evaluación exacta resulta difícil, puesto que siempre va acompañada por pérdidas de calor que se producen al desplazarse el pistón. A fin de contrarrestar en parte la pérdida enunciada, será necesario iniciar la combustión antes que el pistón alcance el PMS, avanzando la chispa. Esto aumentará ligeramente el trabajo negativo de compresión y significará también una pérdida, pero al mismo tiempo, disminuirá notablemente la ocasionada por el retardo en lograr la presión máxima y hará que la combustión se complete antes; es decir el resultado neto será ganancia.

Tanto la presión media indicada como el rendimiento indicado aumentan a medida que lo hace el avance al encendido, hasta que a partir de cierto valor comienzan a decrecer. Esto significa que para cada estado de carga existe un avance óptimo. Si se conociera la velocidad del volumen de gases quemados, podría determinarse analíticamente el valor del avance óptimo. De todas maneras podría aceptarse la regla empírica de UPTON, para la cual ese avance es tal que la mitad del salto de presión se alcanza cuando el pistón está en el PMS, y esto corresponde al 75% del tiempo total de combustión.

El punto de encendido representa el salto de chispa en la bujía. El mismo se da en grados a partir de la posición máxima superior del pistón. El punto de encendido no tiene un valor constante, sino que varía según la carga del motor y las r.p.m. para lograr una combustión óptima.

Cuando el motor trabaja con carga media y mezcla pobre, como es el caso de la carga estratificada, el encendido tiene que adelantarse más que cuando el motor trabaja bajo carga completa y mezcla homogénea. Cuando el motor está regulando el encendido se tiene que retrasar.

Con el encendido totalmente electrónico (comúnmente conocido como encendido mapeado, Fig. 11) se puede obtener el punto de encendido óptimo para cualquier carga del motor.

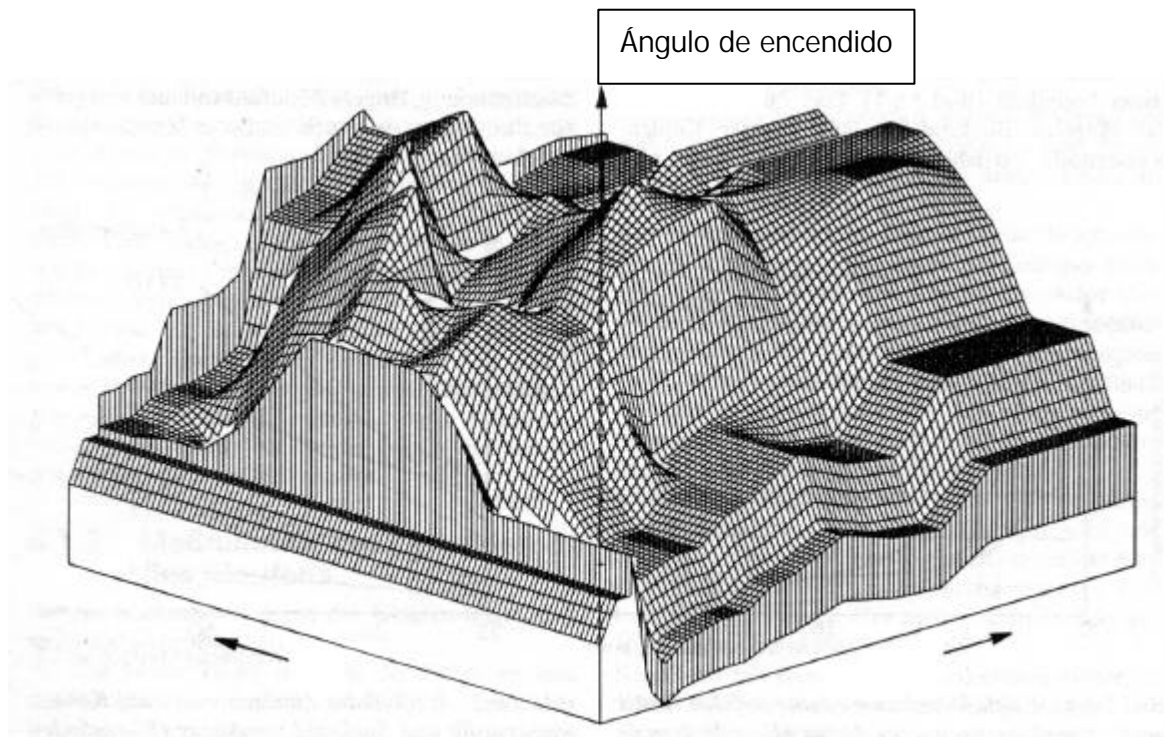


Fig. 11

Para obtener los datos para lograr el encendido óptimo, hay que realizar pruebas en el banco para distintas cargas y r. p. m., hasta obtener la potencia máxima y / u otras cualidades variando el punto de encendido. Cuando digo otras cualidades me refiero a máximo rendimiento, consumo mínimo, poca contaminación, detonación etc.

A continuación voy a mostrar un sistema de inyección directa electrónica desarrollado por la firma sueca Saab (Fig. 12) que combina el inyector con el encendido con lo cual se obtiene una bujía-inyector. Al utilizar este sistema se reduce la complicación constructiva, ya que solo se necesita un solo orificio para inyectar y hacer saltar la chispa. El inconveniente de este sistema es su precio, ya que para fabricarlo, la fábrica tuvo que recurrir a costosos materiales para que la bujía tenga la misma vida útil que la del inyector (o sea la vida del motor).

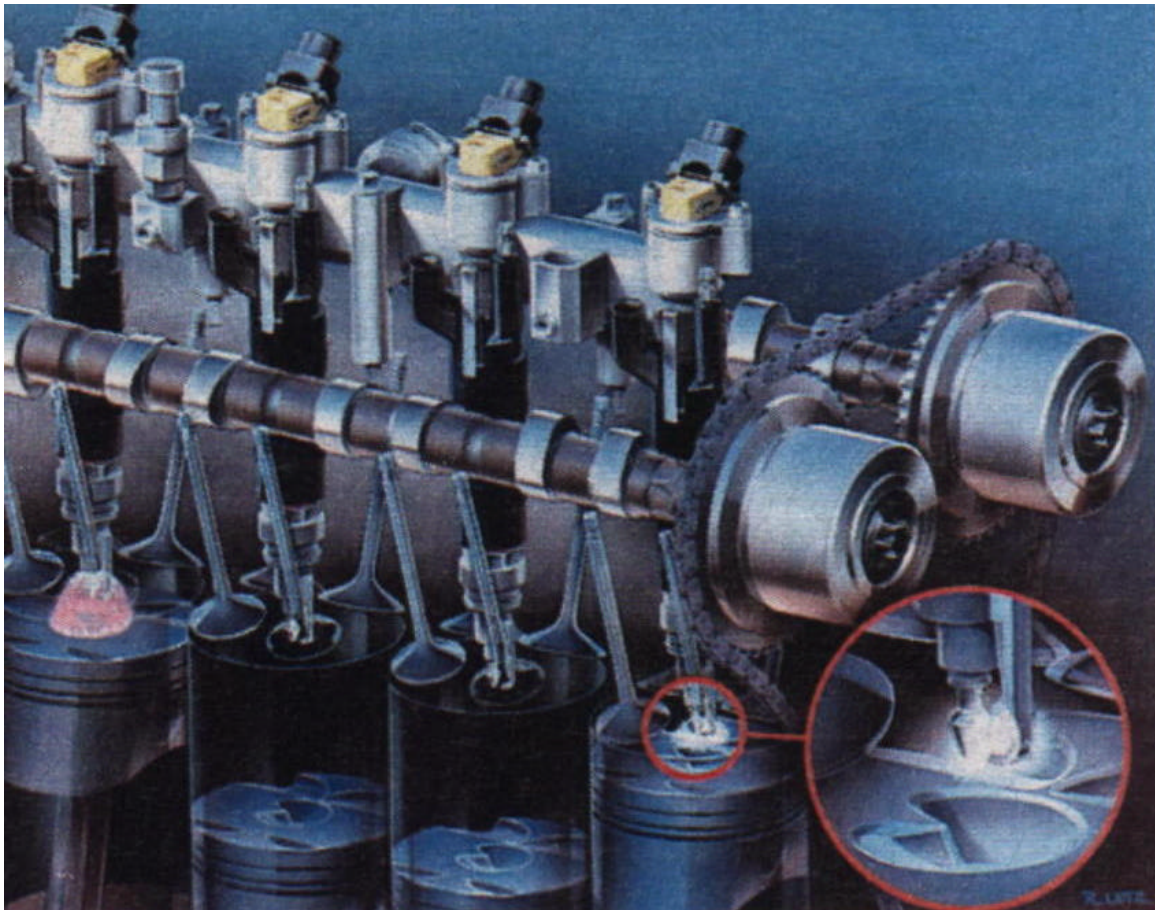


Fig. 12

### Encendido por plasma

En la actualidad se está desarrollando un nuevo sistema de encendido, conocido como Encendido de Alta Frecuencia o Encendido por Plasma (Fig. 13). Con este sistema la bujía es remplazada por una antena, donde su punta en la cámara de combustión, produce un antorcha de plasma, que se parece a un rayo en miniatura. El rayo es producido por un generador de alta frecuencia y por una bobina de resonancia, que en conjunto consumen menos energía que un sistema convencional de encendido.

A diferencia de encendidos normales que logran una duración de chispa de aprox. solo 1,5 milisegundos, el nuevo sistema logra mantener la chispa de 3 a 4,5 milisegundos. Además se le entrega 10 veces más energía a la mezcla que va a encender que el sistema convencional. Debido a la excitación de alta frecuencia de las moléculas de gas en la cámara de combustión, la combustión no se inicia en forma puntual sino en forma de gran volumen.

Con el encendido por plasma se producen temperaturas de varios miles de grados y también se conduce a la combustión más completa de la mezcla que los sistemas comunes.

El empleo de este sistema produce la reducción de la contaminación, porque se reduce el consumo de combustible producido fundamentalmente por un aumento de la velocidad de combustión. Además el encendido por plasma produce la combustión de mezclas pobres, con lo cual se define como el sistema a ser adoptado en el futuro por los motores de inyección directa electrónica y cargas estratificadas.

En la actualidad la electrónica de este sistema ocupa el tamaño de un portafolio, pero la miniaturización está corriendo: se están desarrollando generadores y bobinas en una sola pieza que quepan en el capuchón de la bujía.

Lamentablemente el desarrollo del sistema se está deteniendo debido a la falta de una aislación que mantenga la antena y la cámara de combustión neutral. Una nueva generación de motores no es necesaria para aprovechar las cualidades del encendido de alta frecuencia, pero sí se tiene que modificar la tapa de cilindro.

Este sistema está siendo desarrollado por la firma Holz Electronics de Alemania y se va a construir en serie en tres años.

El único inconveniente de este sistema es la regular temperatura del plasma, la cual es baja, en comparación con los sistemas convencionales.

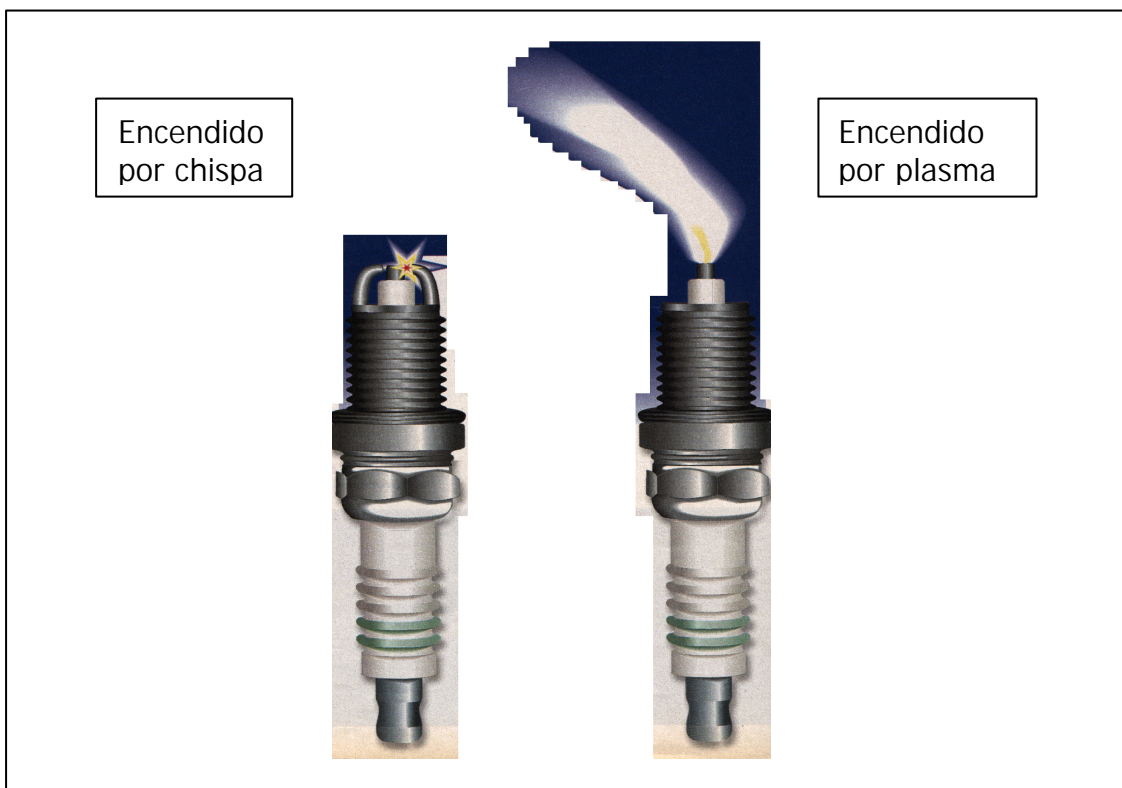


Fig. 13

## Capítulo IV - Las emisiones nocivas de los motores de encendido por chispa (ECh)

Las emisiones de los motores ECh provienen en su mayor parte de los gases de escape y, en menor medida, de los gases que se filtran entre cilindros y pistones. La evaporación de gasolina que puede provenir de la instalación de alimentación es asimismo causa de emisiones nocivas.

Como ya hemos dicho, además del anhídrido carbónico y del agua que deberían ser los únicos productos presentes en el escape en caso de combustión completa de los hidrocarburos, en los gases de escape de los motores ECh se encuentra:

- óxido de carbono CO
- hidrocarburos no quemados y parcialmente oxidados HC
- óxidos de nitrógeno NOx
- óxidos de azufre SOx

Los límites europeos de emisiones peligrosas se redujeron en el 2000 y se reducirán aún más en el 2005. La Euro IV limita para ese año los valores de los HC, de los NOx y de las partículas, que serán una quinta parte de los niveles actuales y serán obligatorios los nuevos ciclos de ensayo sin periodo de calentamiento.

La preocupación por el efecto invernadero ha persuadido a la mayoría de los fabricantes europeos de automóviles a comprometerse en la presentación de coches que, como media, emitan menos de 140 g / km de CO<sub>2</sub> para el 2008. este dato representa una reducción superior al 25% en el consumo de combustible respecto de 1990.

### **Influencia de la relación aire-combustible en la emisión de contaminantes.**

Las emisiones de los contaminantes NOx, CO y HC dependen en su mayor medida de la relación aire-combustible, como lo muestra la figura 14.

Para que el porcentaje de CO se mantenga bajo, el motor tiene que trabajar con relación  $\lambda > 1,1$  o sea con mezclas pobres.

El CO es muy tóxico por su gran afinidad con la hemoglobina de la sangre (300 veces mayor que la del oxígeno). Si la concentración de la carboxihemoglobina en la sangre alcanza el 50%, la asimilación del oxígeno se interrumpe y se produce la asfixia interna.

La emisión de hidrocarburos no quemados alcanza su mínimo con  $\lambda = 1,1$ , para aumentar luego con mezclas ricas. El aumento de hidrocarburos no quemados se relaciona con la combustión incompleta.

La temperatura de la pared del cilindro influye en la formación de HC porque la llama cuando hace contacto con la pared fría se extingue. Disminuyendo la superficie de la pared se reduce su capacidad de enfriamiento.

Los hidrocarburos no quemados HC no presentan por sí mismos efectos tóxicos, pero cuando se encuentran en un porcentaje elevado y en determinadas condiciones atmosféricas, pueden dar lugar a reacciones químicas secundarias, con producción de peróxidos y aldehídos de olor desagradable, irritantes, y nocivos para las plantas. El agente que determina las reacciones es el óxido de nitrógeno, que bajo el efecto de las radiaciones solares ultravioletas y en presencia de sustancias orgánicas se oxida pasando a NO<sub>2</sub>, el cual por acción de la luz solar (efecto fotoquímico) actúa sobre los HC desarrollando ozono y productos oxidados. Al benzopireno 3-4 se le atribuyen propiedades cancerígenas.

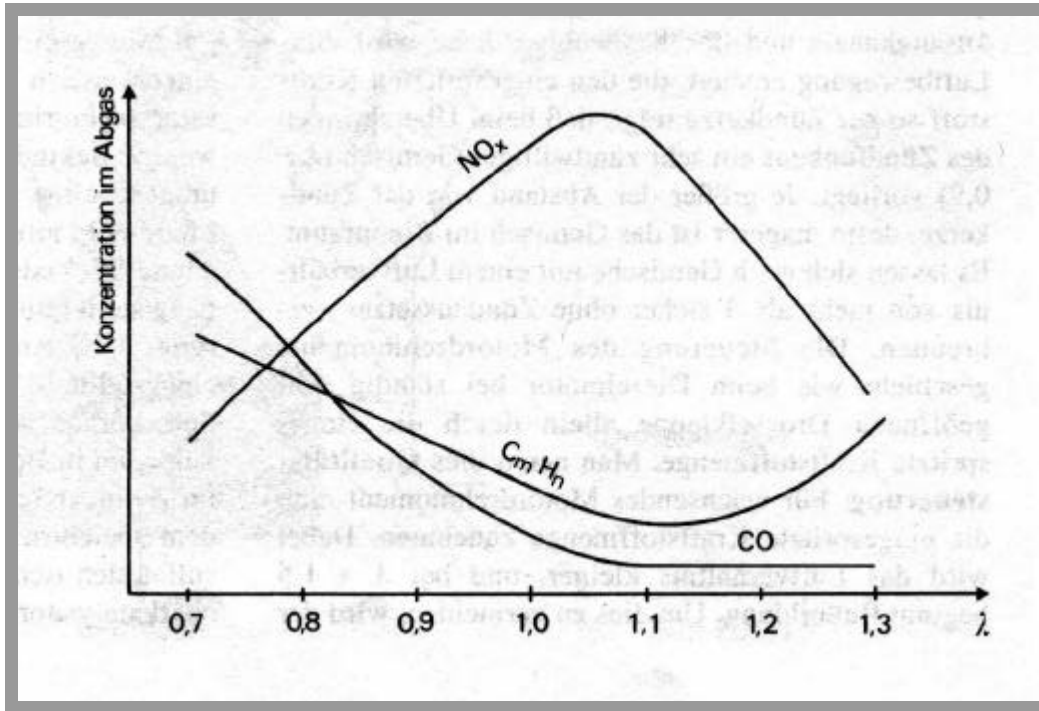


Fig. 14

Los óxidos de nitrógeno NOx son tóxicos para la sangre, pero las concentraciones en la atmósfera debidas a los gases de escape no parecen ser dañinas para el organismo humano. Parece que por oxidación de ozono el NO se transforma en ácido nítrico, el cual origina irritación de los ojos, efecto que parece unido a los peróxidos y a los aldehídos.

### Óxidos de nitrógeno NOx

Los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión y la reacción química aumenta bastante con la temperatura. Como resultado tenemos grandes diferencias de concentración de NOx entre los primeros elementos y los últimos para quemarse. Además, la disociación es detenida por la repentina disminución de la temperatura (Aprox. 2000° K) debida a la expansión.

La concentración depende del contenido de oxígeno disponible para la reacción con el nitrógeno y de la temperatura: varía por lo tanto con la dosificación, con la carga del motor y con el avance del encendido. En este diagrama donde la medida de la concentración está dada en partes por millón (p. p. m.) se puede observar que, yendo de mezclas ricas a mezclas pobres, a partir de un cierto valor de la razón A / C, el efecto de la disminución de temperatura prevalece sobre el debido al aumento de la concentración de oxígeno disponible para la reacción de oxidación del nitrógeno.

Por cuanto las temperaturas máximas de combustión se incrementan por un mayor avance del encendido y por una mayor presión absoluta en el múltiple de admisión, resulta evidente que estos factores provocan mayores emisiones de NOx. También el aumento de la relación de compresión causa generalmente un aumento de las emisiones específicas de NOx.

### Catalizador de acumulación

El catalizador de acumulación acumula durante la combustión con mezclas pobres el óxido de nitrógeno (NOx) debido a la transformación del material de acumulación, un óxido de metal, en nitrato del metal. Debido a esto el óxido de metal es consumido y luego de unos pocos minutos desaparece. Para que el catalizador pueda seguir acumulando, tiene que ser regenerado. Por tal motivo el motor trabaja por unos pocos segundos con una mezcla rica ( $\lambda=0,9$ ) y homogénea. Entonces se transforma el nitrato del metal en óxido de metal nuevamente y al mismo tiempo es reducido el Nox en nitrógeno (N<sub>2</sub>, Fig.15). Este método sobrecarga naturalmente el sistema electrónico de control del motor para poder mantener constante el par del motor, porque en ese momento la carga es homogénea y el control lo hace la mariposa. Por tal motivo se está ensayando equipos con post-inyección de combustible. Con la segunda inyección se logra aumentar el contenido de HC para recuperar las funciones del catalizador con un ligero aumento del consumo de combustible.

El catalizador de acumulación reacciona muy fácilmente con el azufre contenido en el combustible. En la combustión se forma en el cilindro óxidos de azufre (SOx) que reaccionan con el material de acumulación formando sulfato de metal. Como este sulfato no se deja regenerar, pierde el catalizador su capacidad de acumulación. Por tal motivo el combustible tiene que tener lo mínimo posible la cantidad de azufre y / o hacer el catalizador inerte ante el azufre.

El problema para la utilización de este tipo de catalizador radica en que luego de recorrer aproximadamente 10000 km el catalizador pierde su capacidad de acumulación debido a la cantidad de azufre que contiene la nafta actualmente. Además su precio es mayor que el de tres vías y es más caro el precio del combustible debido a la menor cantidad de azufre que contiene.

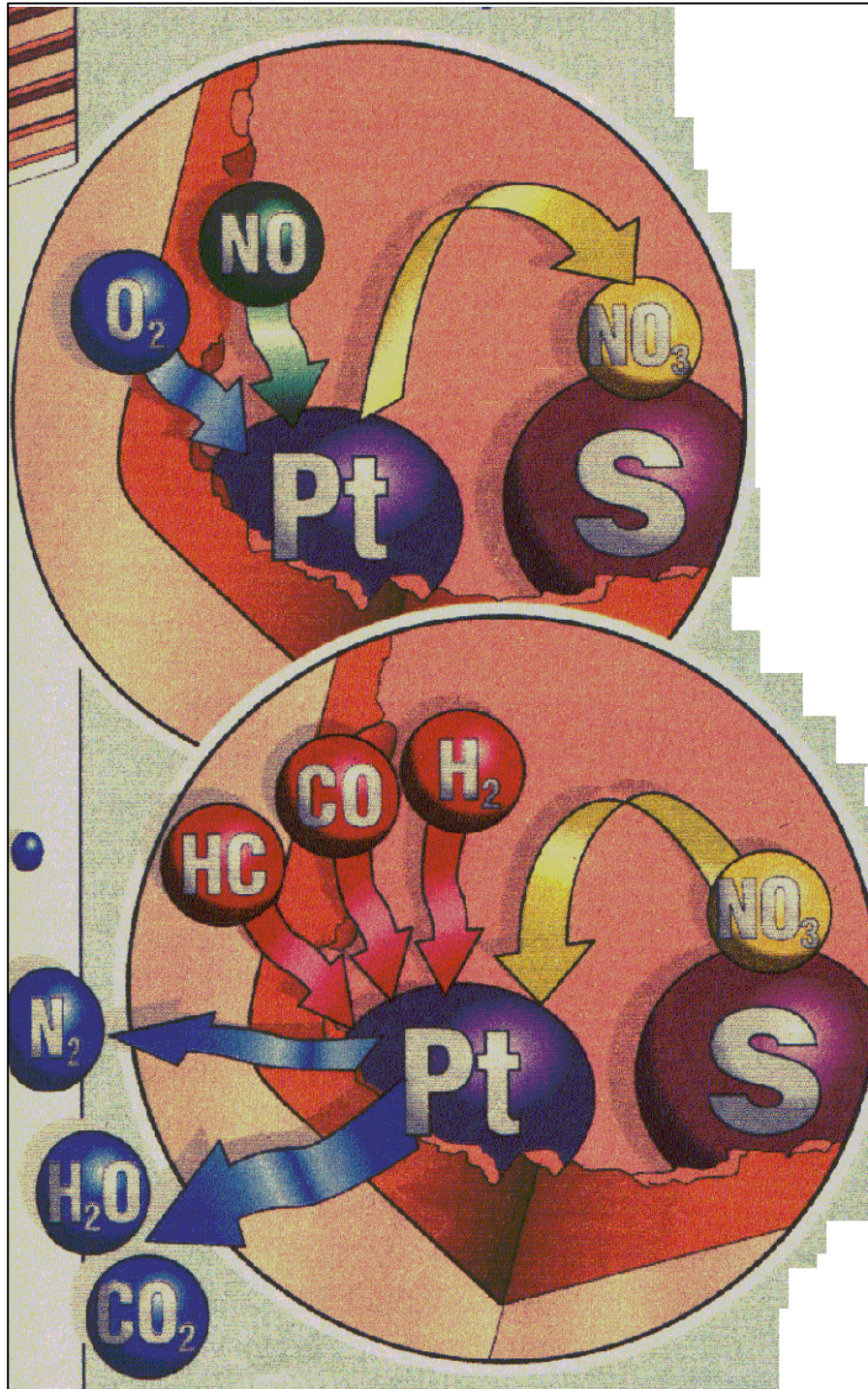


Fig. 15

- Partes no quemadas presentes en el escape.
- Material de acumulación.
- Componentes del escape a la salida del catalizador.



### Catalizador DeNOx

Existe otro sistema que funciona mejor que es el catalizador DeNOx. Este tipo de catalizador se utiliza el motor GDI de Mitsubishi. El catalizador DeNOx tiene una capa adicional de iridio en comparación con el catalizador de acumulación. Además del nombre anterior, este tipo de catalizador se lo suele denominar *catalizador de reducción selectiva*.

Este catalizador es muy parecido también a los catalizadores de tres vías que se usan en los motores de inyección electrónica indirecta.

Su funcionamiento (fig. 16) es muy parecido al de acumulación con la diferencia de que en un solo paso las partículas de hidrocarburos no quemados (HC), el monóxido de carbono (CO), oxígeno (O<sub>2</sub>) y Nox se transforman en N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Para lograr esto se tiene que trabajar con mezclas ricas o realizar una post-inyección de combustible luego de la explosión para obtener ese pequeño exceso de combustible que logra junto con el catalizador reducir el nivel de Nox a un valor muy aceptable. Esto se puede realizar solo con motores de inyección directa electrónica.

Como el catalizador trabaja con exceso de combustible el consumo aumenta al igual que aumenta la temperatura del catalizador. Y esto no es bueno para el catalizador, ya que la amplitud de temperatura de trabajo del mismo es muy pequeña.

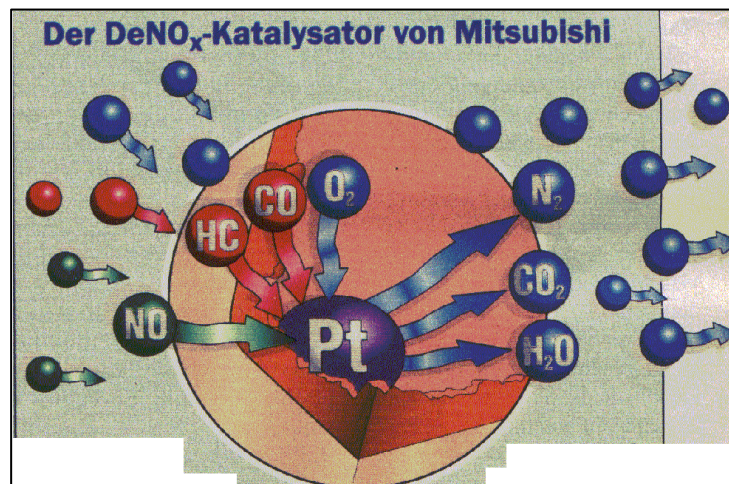


Fig. 16

### Motores sobrealimentados

En un motor sobrealimentado la mezcla o el aire es conducido al cilindro por un compresor bajo presión. Por tal motivo aumenta la masa de aire o mezcla en el cilindro, con lo cual se puede quemar más combustible y la potencia aumenta proporcionalmente con la cantidad de mezcla o aire que ingresa en el cilindro.

Mediante la sobrealimentación es posible aumentar la potencia sin variar la cilindrada y el número de revoluciones, o bien obtener la misma potencia con una cilindrada menor y por lo tanto con un motor de dimensiones y peso inferiores.

El aumento de la potencia puede ser entonces muy importante si la sobrealimentación es poderosa. El límite está dado por el comienzo de la detonación, por lo que, en general, es necesario reducir la relación de compresión, es decir aumentar el volumen de la cámara de combustión. Como el aire por defecto de la compresión y el rozamiento se calienta y su densidad disminuye, se recurre, para remediar esto, a un intercambiador de calor que, intercalado entre el compresor y los cilindros, reduce la temperatura del fluido a un nivel suficientemente bajo.

Hoy en día casi todos los motores diesel para automotores, ya sean personales, de transporte o de carga, son sobrealimentados.

En los motores de encendido por chispa el turbo no obtuvo aceptación, ha excepción de los motores para coches deportivos, debido a que solo se logra reducir el consumo cuando el motor trabaja con cargas altas, o sea cuando la mariposa (estrangulación) está bastante abierta. Caso que no sucede en los motores de ciclo Diesel porque no tienen mariposa en la admisión y "siempre" toman la misma cantidad de aire. El uso de la sobrealimentación tiene dos causas:

- Aumento de la potencia, siempre acompañada de una baja del consumo específico, para un motor con las mismas medidas y r. p. m..
- Estabilidad de la potencia al variar la altitud de funcionamiento (misma potencia frente al mar y en la montaña).

Los compresores se pueden clasificar en dos categorías: centrífugos (Fig. 17) y volumétricos (Fig. 18). Los centrífugos consisten esencialmente en un rotor centrífugo y un difusor, este forma parte de la carcasa con forma de caracol. Los volumétricos pueden ser de lóbulos, de paletas o de pistones.

Por último el turbocompresor tiene la ventaja de usar parte de la energía térmica de los gases de escape, energía que de otro modo se perdería, presenta la ventaja fundamental de ser fácilmente aplicable a cualquier motor. El balance económico de ejercicio de un motor sobrealimentado resulta un conjunto favorable, porque conlleva solo una leve merma de potencia del motor, debido a la contrapresión del escape.

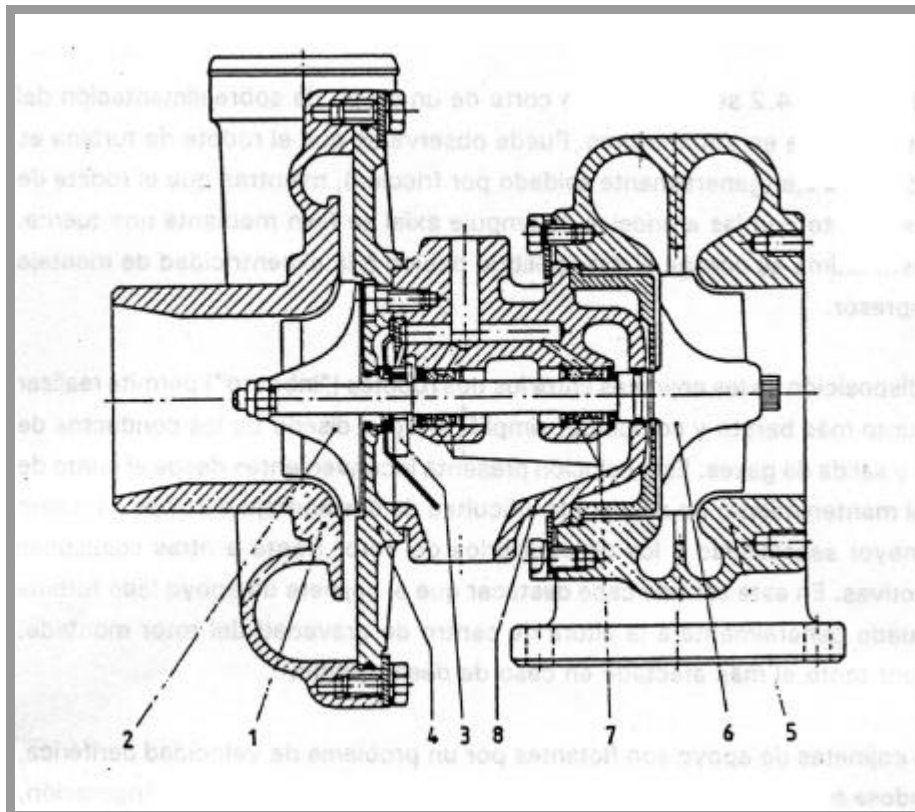


Fig. 17

Fig. 17, turbocompresor:

1. Carcasa del compresor.
2. Rotor compresor.
3. Cojinete axial.
4. Carcasa del eje.
5. Carcasa de la turbina.
6. Rotor turbina.
7. Cojinete radial.

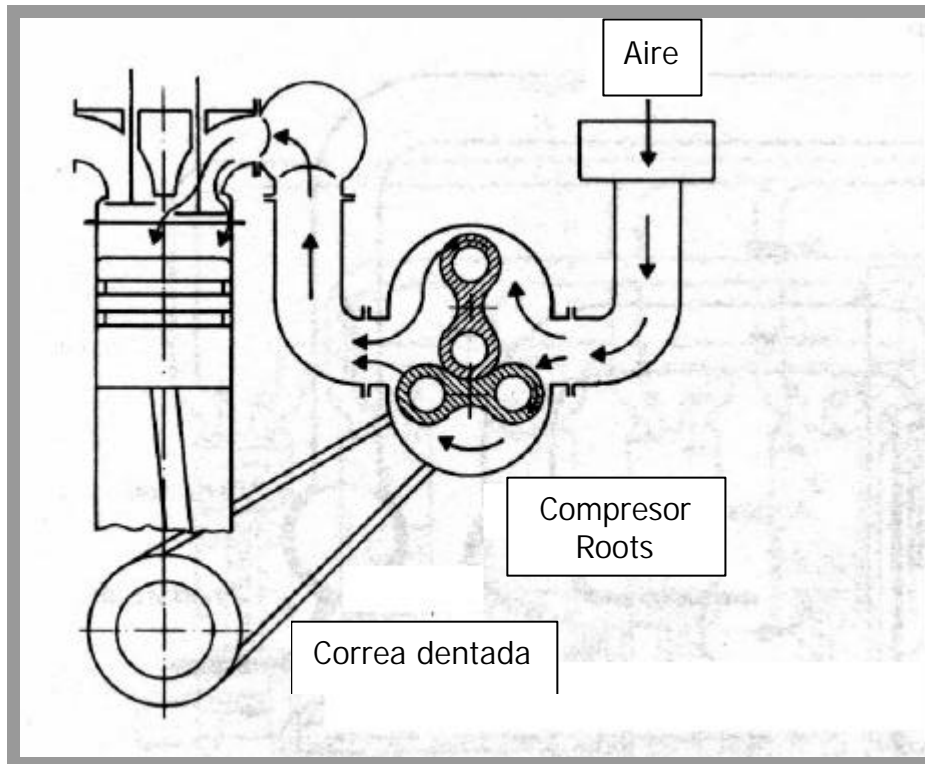


Fig. 18

Por último, en la figura 19 nos encontramos con dos gráficos P-V de un motor de aspiración normal y de uno sobrealimentado. Es obvio que el pistón del motor sobrealimentado realiza un trabajo positivo cuando se realiza el llenado del cilindro. Como observamos en los gráficos, el motor sobrealimentado comienza la fase de compresión un escalón más arriba que el del motor de aspiración normal. Con lo cual se logra un pico de presión más elevado y un área de trabajo más grande. Lo que se traduce en un aumento de potencia y en un aumento del rendimiento.

En los motores de encendido por chispa con inyección directa electrónica de combustible y cargas estratificadas, la sobrealimentación produce las siguientes características:

- Aumenta la potencia.
- El llenado del cilindro en toda la gama de revoluciones es independiente del estado de carga (no tiene mariposa y si la tiene esta sólo trabaja cuando la carga es alta).

Con la sobrealimentación se puede trabajar con exceso de aire para no llegar al límite de la emisión de humos, sin pérdida de potencia, con lo cual se puede desechar la mariposa en la admisión.

- Se puede utilizar una mayor relación de compresión en comparación al motor de encendido por chispa que trabaja solo con cargas homogéneas.
- Al aumentar el rendimiento debido a la mayor presión del aire al comienzo de la etapa de compresión y al trabajo positivo de bombeo, se reduce el consumo.
- Cuando se trabaja con presiones elevadas es necesario colocar un intercambiador de calor para enfriar el aire y evitar la detonación.

Poca pérdida de potencia debido a la altura.

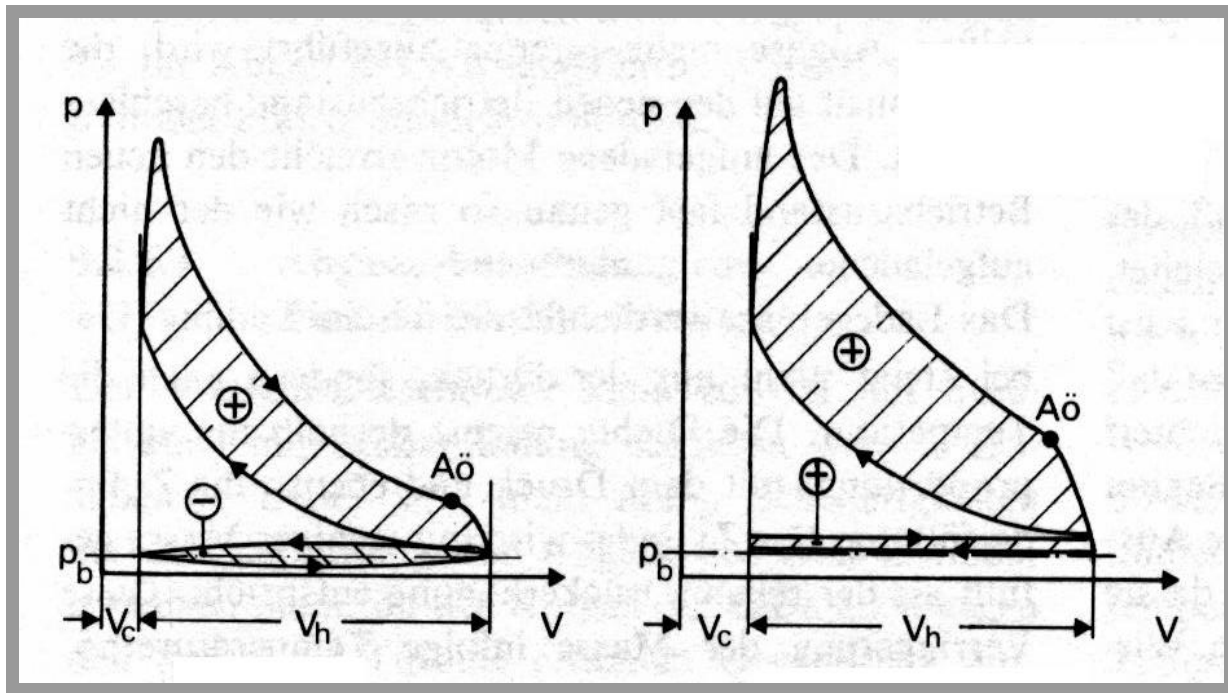


Fig. 18

$P_b$ : presión atmosférica.

$A_{\ddot{o}}$ : apertura de la válvula de escape.

$V_c$ : volumen de la cámara de combustión.

$V_h$ : volumen del cilindro.

### Sobrealimentación por turbina de escape

La sobrealimentación por turbina de escape es la más ampliamente utilizada, debido a las ventajas de rendimiento y a la flexibilidad que permite la ubicación del compresor en el vano motor.

La energía disponible en el escape en los motores de encendido por chispa que trabajan con mezcla homogénea es muy abundante, porque la temperatura del escape es muy alta, lo que obliga a usar mecanismos de regulación que limitan la presión de sobrealimentación. A pesar de ello, la energía disponible a altas revoluciones es tan elevada que satura el mecanismo de regulación, obligando a restringir el margen de utilización del motor para impedir sobrepresiones inaceptables en el régimen de potencia máxima.

En los motores de encendido por chispa pero que no trabajan con mezclas homogéneas al igual que en los motores diesel la energía disponible en el escape es limitada, porque la temperatura de los gases de escape es baja cuando el motor trabaja con bajas cargas, por lo tanto deben considerarse con mucho cuidado el diseño de la geometría de los colectores y en el diseño de acoplamiento la variación del rendimiento combinado del turbo compresor con las condiciones operativas.

En la figura 20.1 se representa el ciclo teórico de aire a presión limitada de un motor aspirado. El área 1-4-5, resultante de continuar la expansión isentrópica hasta la presión atmosférica, representa la energía disponible en el punto 4 para el accionamiento de la turbina.

Si el motor está sobrealimentado, la presión durante la carrera de escape es mayor que la atmosférica. Por este motivo, la energía disponible en el escape ligada a la expansión isentrópica hasta la presión atmosférica, área 4-6-7 en la figura 20.2, se añade el trabajo realizado por el pistón durante la carrera de escape 7-8-9-11.

Siempre en el caso de un ciclo teórico de aire, y suponiendo rendimientos unitarios de compresor y turbina, el área 4-6-7-8-9-11 en la figura 20.2 debe ser igual al trabajo de compresión (Fig. 20.3). Aumentos de la presión de sobrealimentación conllevan, a pesar del aumento del área 4-6-7, un aumento de la contra presión de escape para cumplir la ecuación de energía.

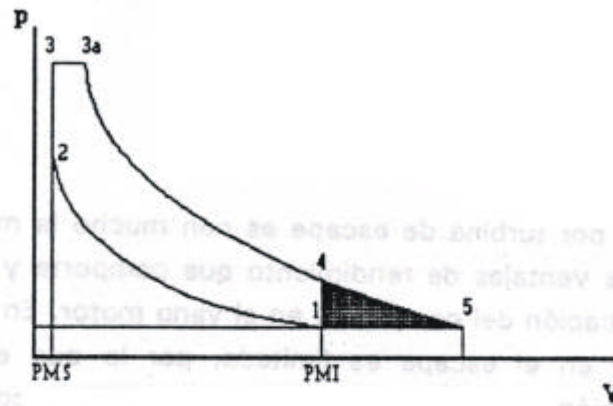


Fig. 20.1. Energía disponible del motor normalmente aspirado

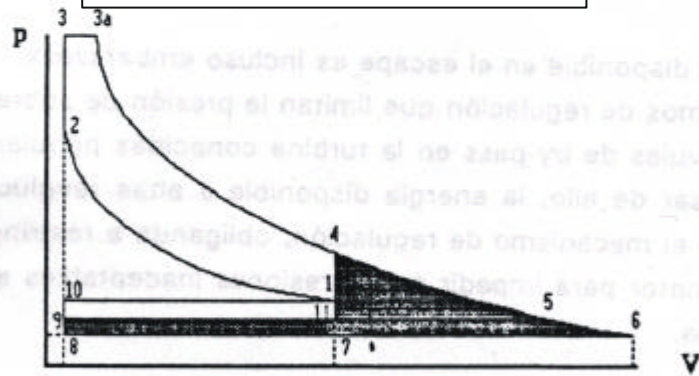


Fig. 20.2. Energía disponible del motor turbo-sobrealimentado

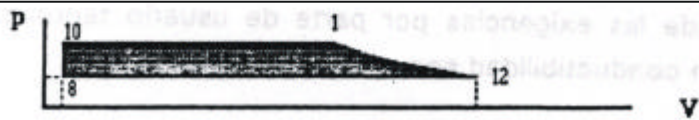
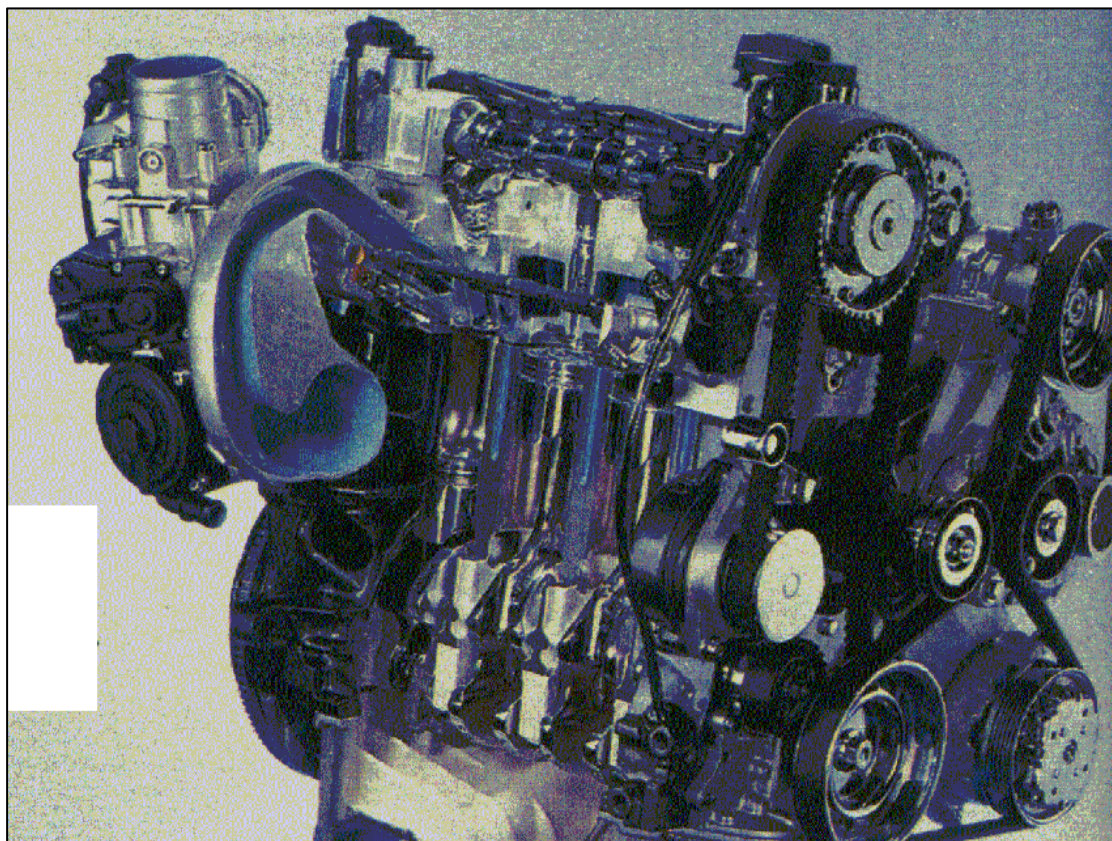
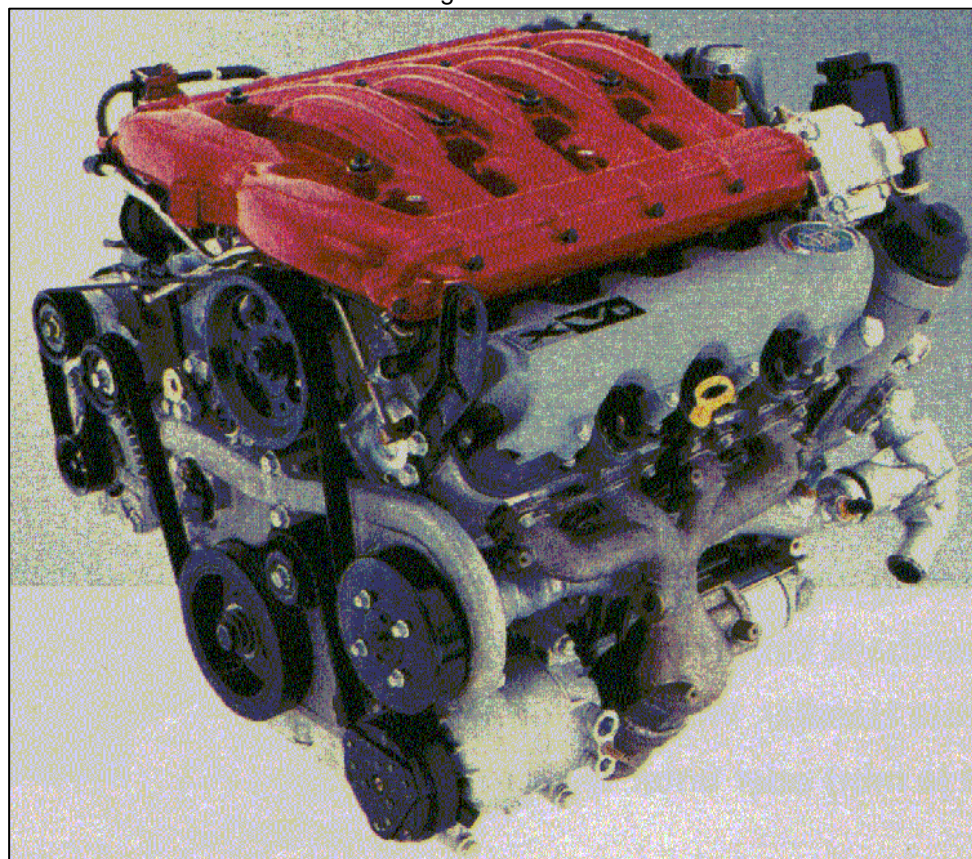


Fig. 20.3. Trabajo de compresión

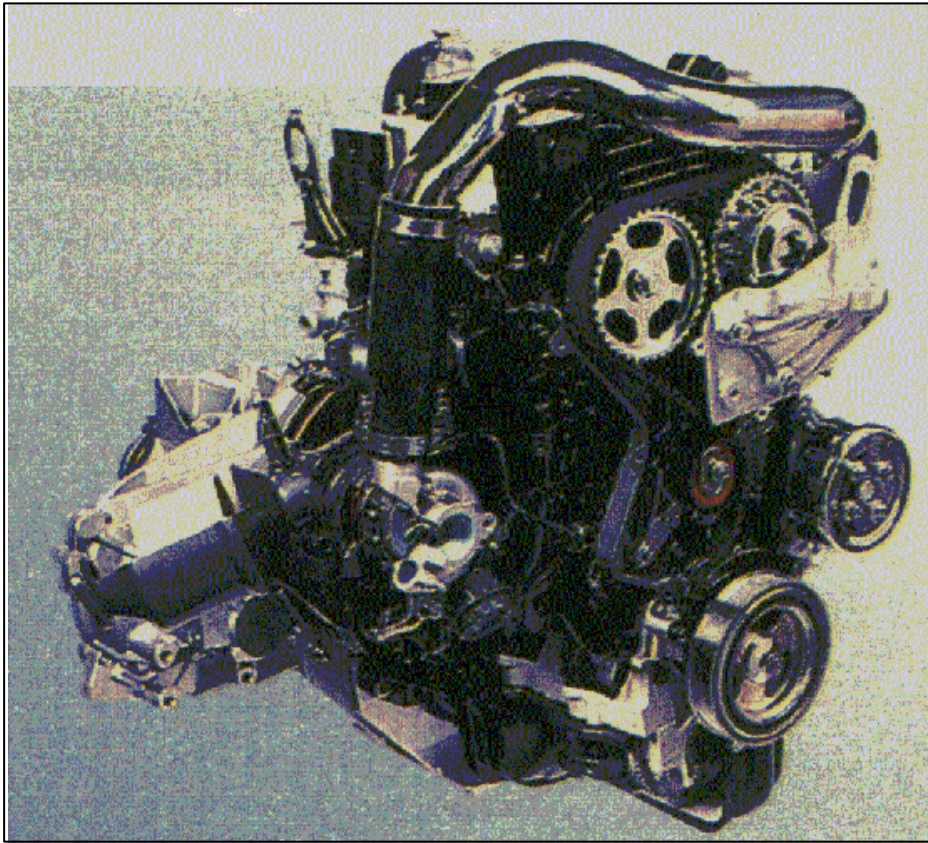
## Capítulo VI - Motores de inyección directa electrónica multipunto




Motor Volkswagen 1.6 FSI de 110 CV.



Motor V-8 compacto y liviano de General Motors que se puede instalar transversalmente.

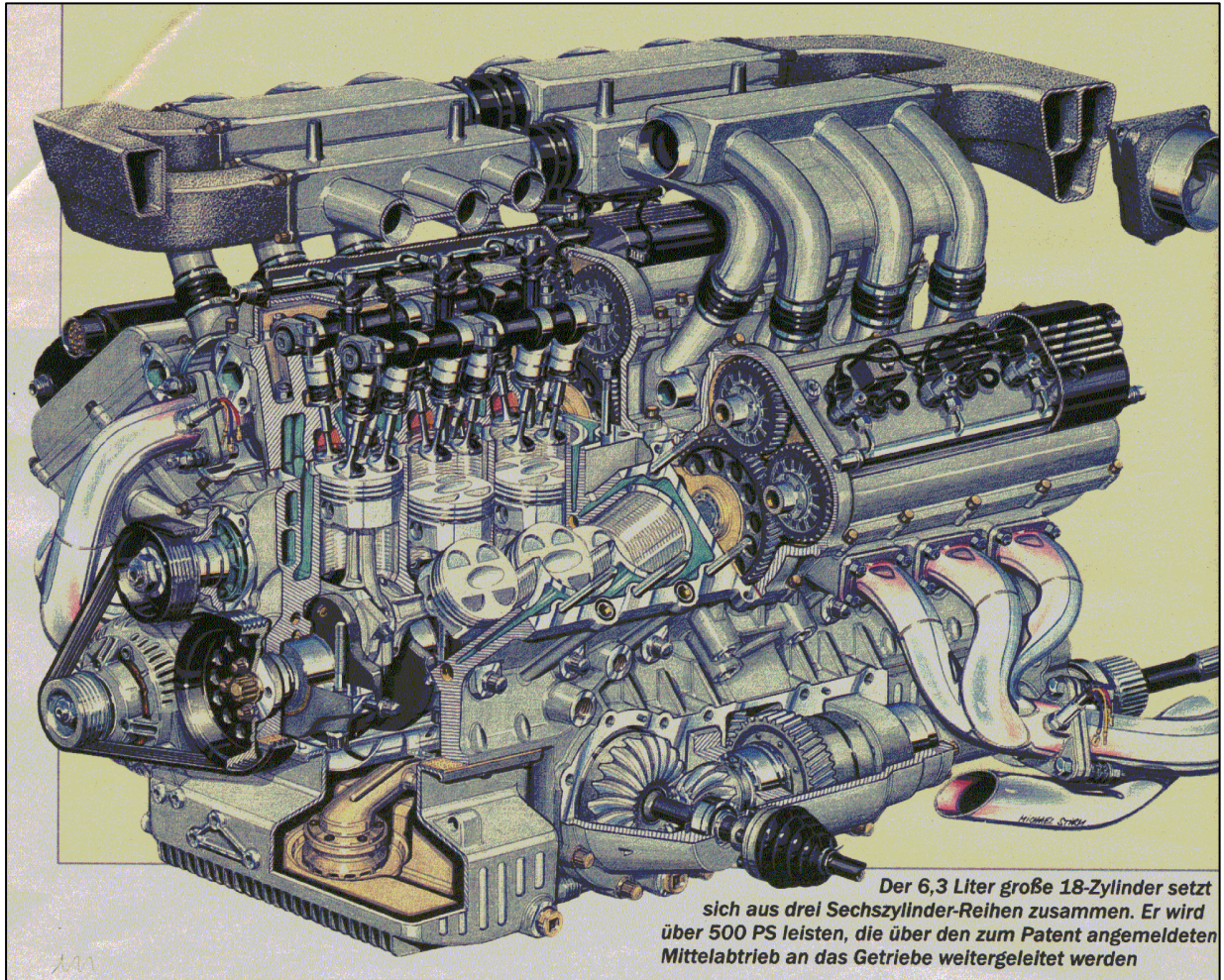


Pequeño motor de 3 cilindros DISI de Ford para el nuevo Fiesta.

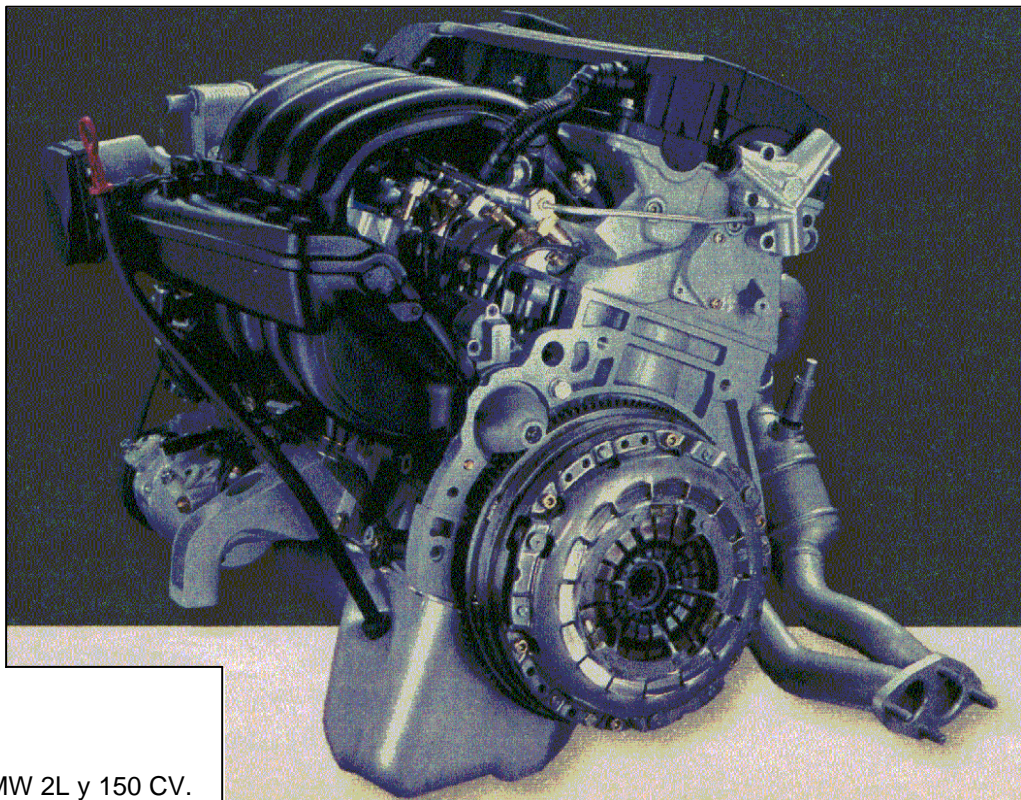


**Sparmeister Lupo FSI**  
 Der erste deutsche Benzin-Direkt-einspritzer kommt aus Wolfsburg. Der 1,4 Liter große Aluminium-Vierzylinder leistet 105 PS. Das 12:1 verdichtete Aggregat soll bis zu 17 Prozent einsparen. Im Leichtbau-Lupo wird so die Fünf-Liter-Grenze geknackt. Ein elektronisch überwachter Denox-Kat mit Regenerationsmodus sorgt auch bei schwefelhaltigem Kraftstoff für saubere Abgase

Motor VW de 4 cilindros, 1,4 litros, relación de compresión de 12:1, 105 CV y catalizador DeNOx. El consumo debe ser de un 17% menor y se encuentra por debajo de los EU 5 l / km.

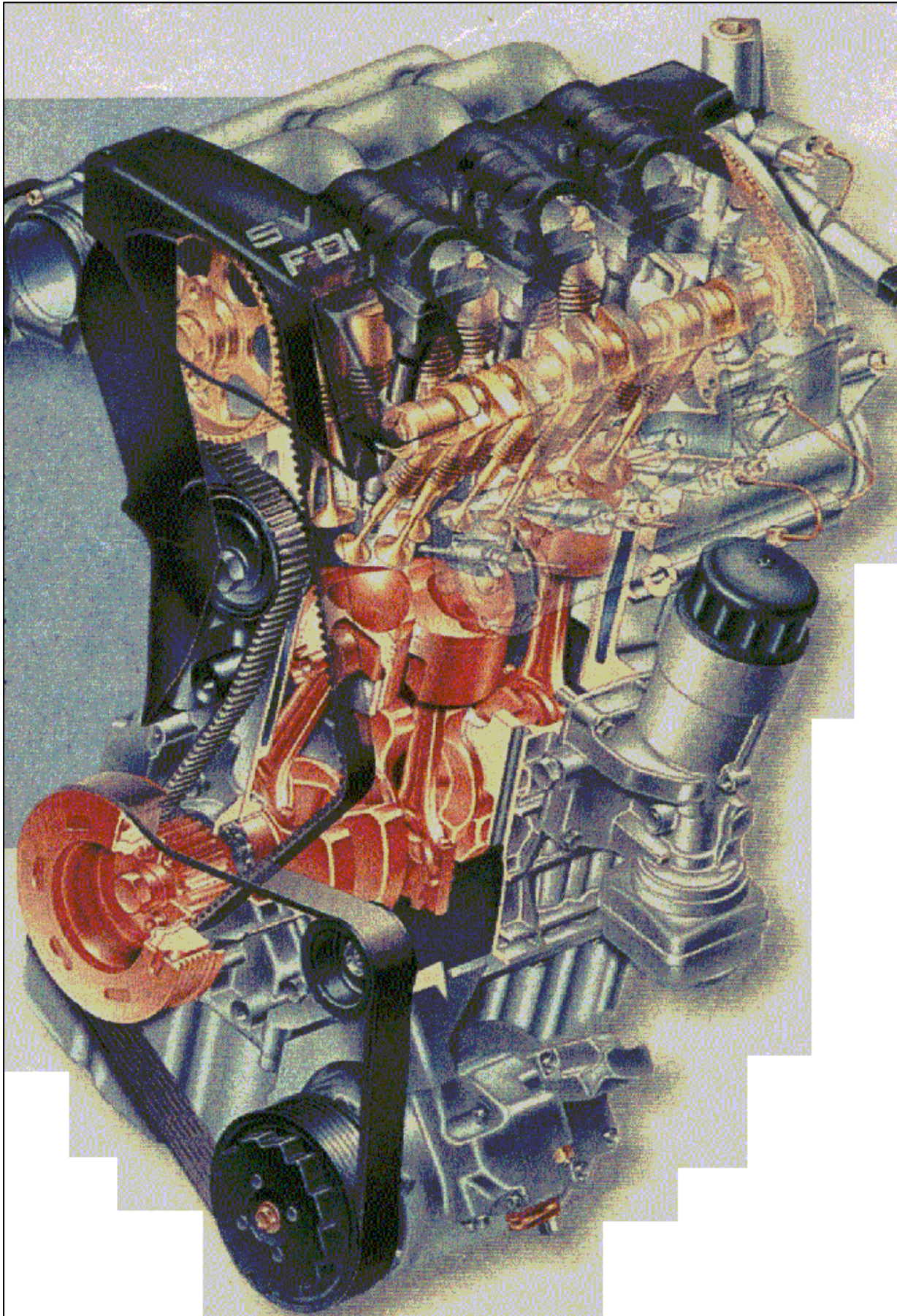


Motor W de 18 cilindros, 6,3 litros y más de 500 CV de la marca Bugatti.

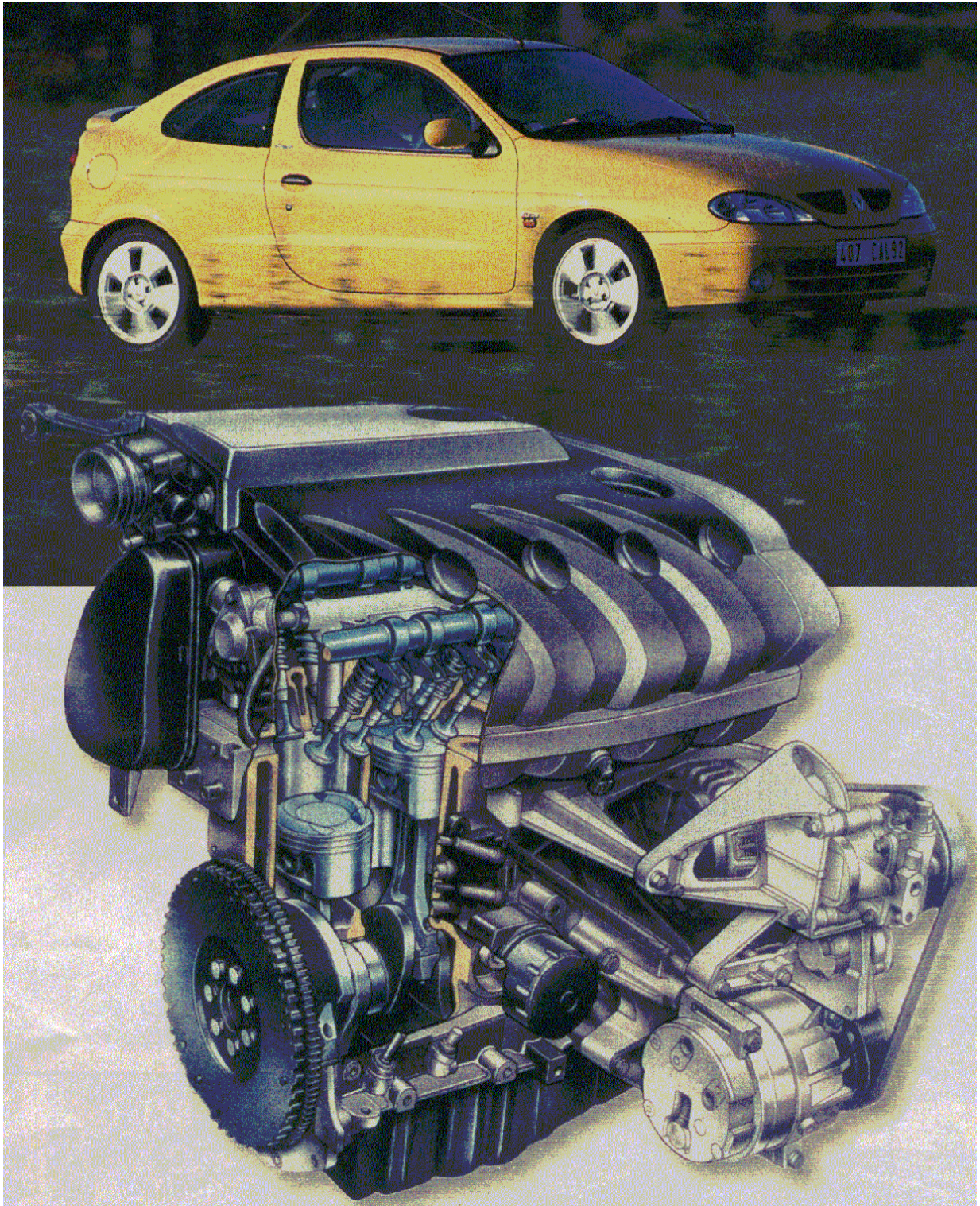


Motor BMW 2L y 150 CV.

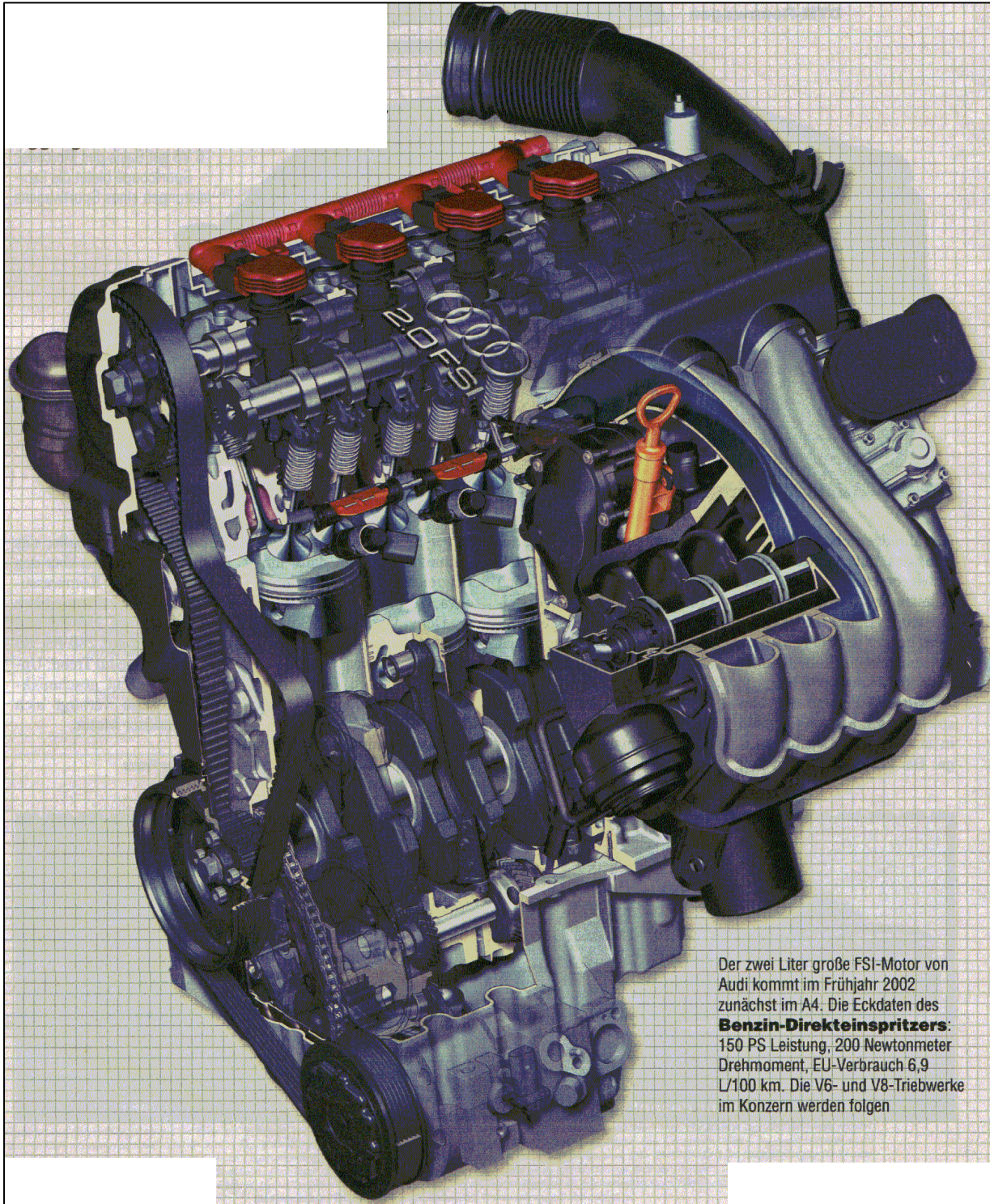




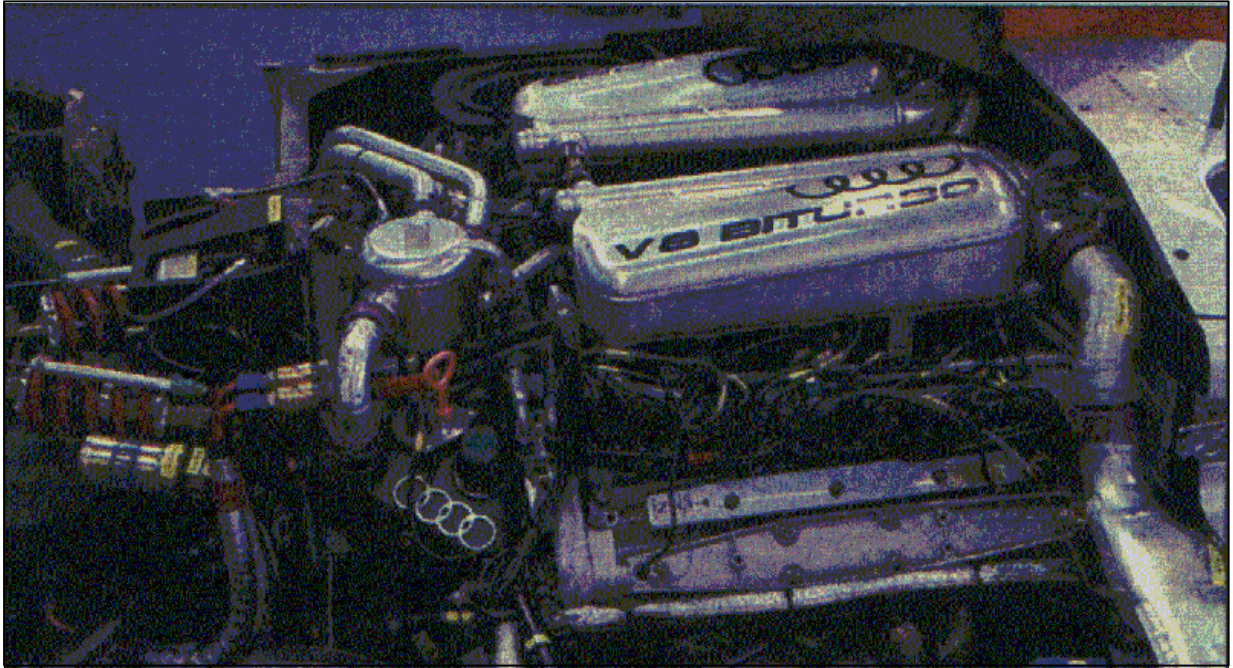
Motor AUDI FSI 1.2 de 3 cilindros y 75 CV.



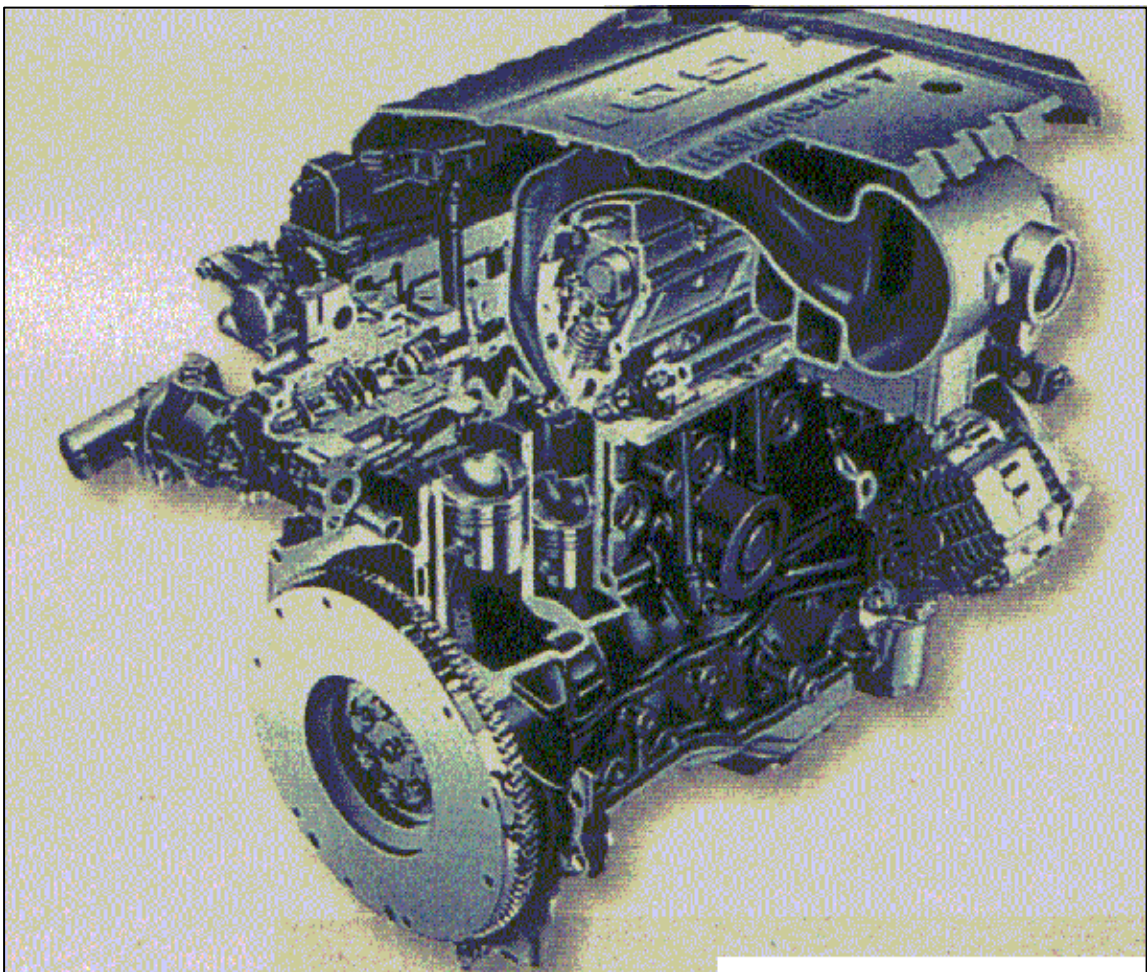
Motor Renault 2.0 IDE de 140 CV que no trabaja con mezclas pobres. Solo se comercializa en la Coupé Megane. Fue el primer motor de inyección directa construido en serie en Europa.



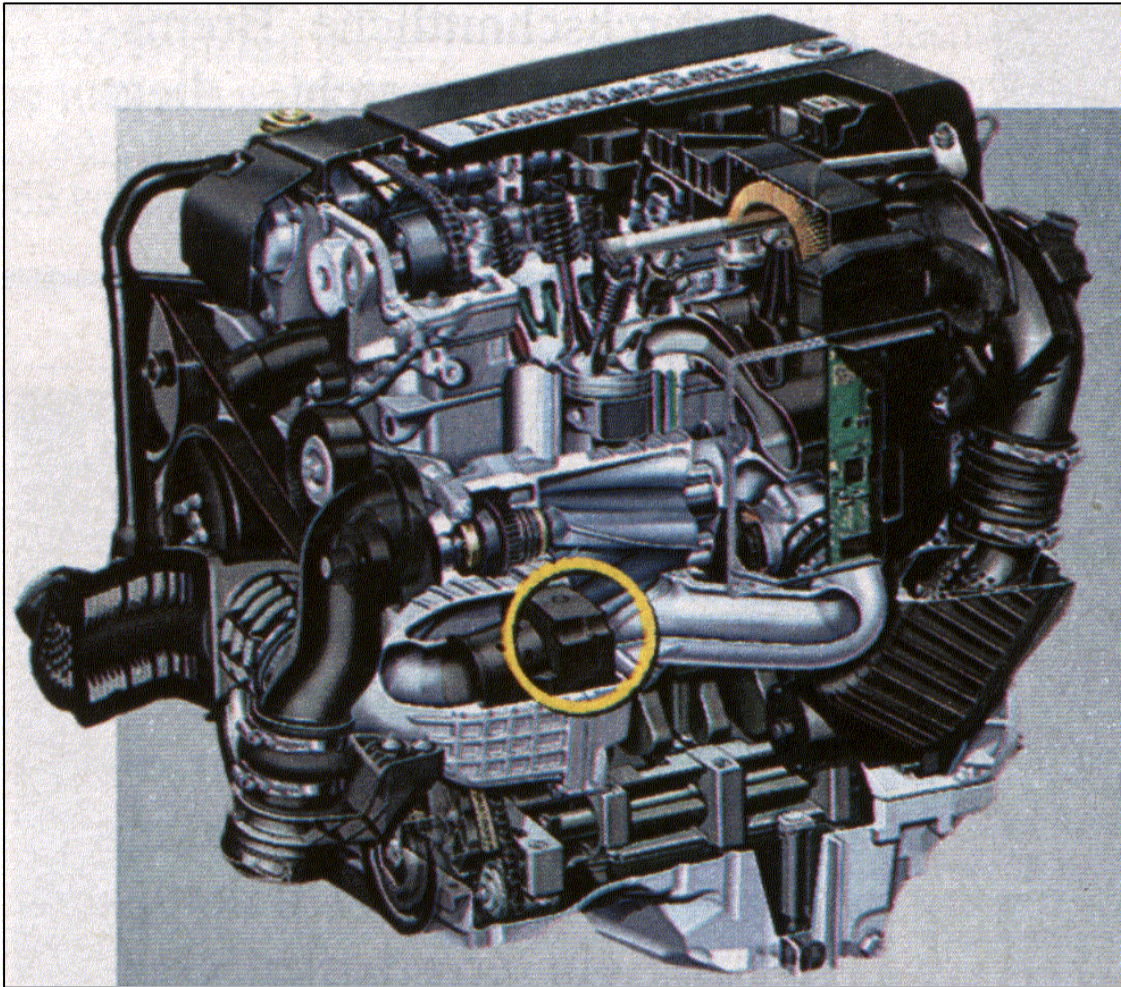
Motor AUDI 2.0 FSI de 150 CV, 200 Nm y un consumo EU-6Q,9 L/100km.



Motor AUDI con tecnología FSI de VW ganador de las 24 horas de Le Mans. Tiene inyector central que inyecta a 100 bar, 8 cilindros en V biturbo, 3,6 litros y 610 CV.



Motor Mitsubishi GDI, primer motor moderno de inyección directa electrónica y cámara de combustión estratificada construido en serie hacia finales de los 90.



Motor Mercedes-Benz de 1,8 litros, sobrecargado, de 180 Cv. Trabaja con cargas estratificadas.

### Motor del futuro

El motor del futuro se encuentra representado por la figura 21 y está construido con cilindros, pistones y bancadas de cerámica de bajo coeficiente de rozamiento, lo cual permite omitir la lubricación salvo en condiciones de mucha exigencia y reduce las pérdidas por rozamiento. Por tal motivo se utiliza bomba de aceite eléctrica que entra en funcionamiento cuando se necesita. La cerámica es un material aislante, lo cual genera que el proceso de compresión y expansión sea adiabático lo que representa un aumento del rendimiento.

La apertura de las válvulas se realiza por electroimanes, con lo cual se logra el mejor llenado para cualquier velocidad de rotación del motor. También se logra reducir la fricción debido a que no tiene árbol de levas y se reducen las dimensiones de la tapa de cilindro.

Por último tiene bomba de agua eléctrica que funciona cuando se la necesita y reduce la pérdida de potencia del motor en gran medida cuando el motor gira a grandes revoluciones, pérdida que no se puede hacer desaparecer cuando la bomba está conectada directamente al cigüeñal por una correa.

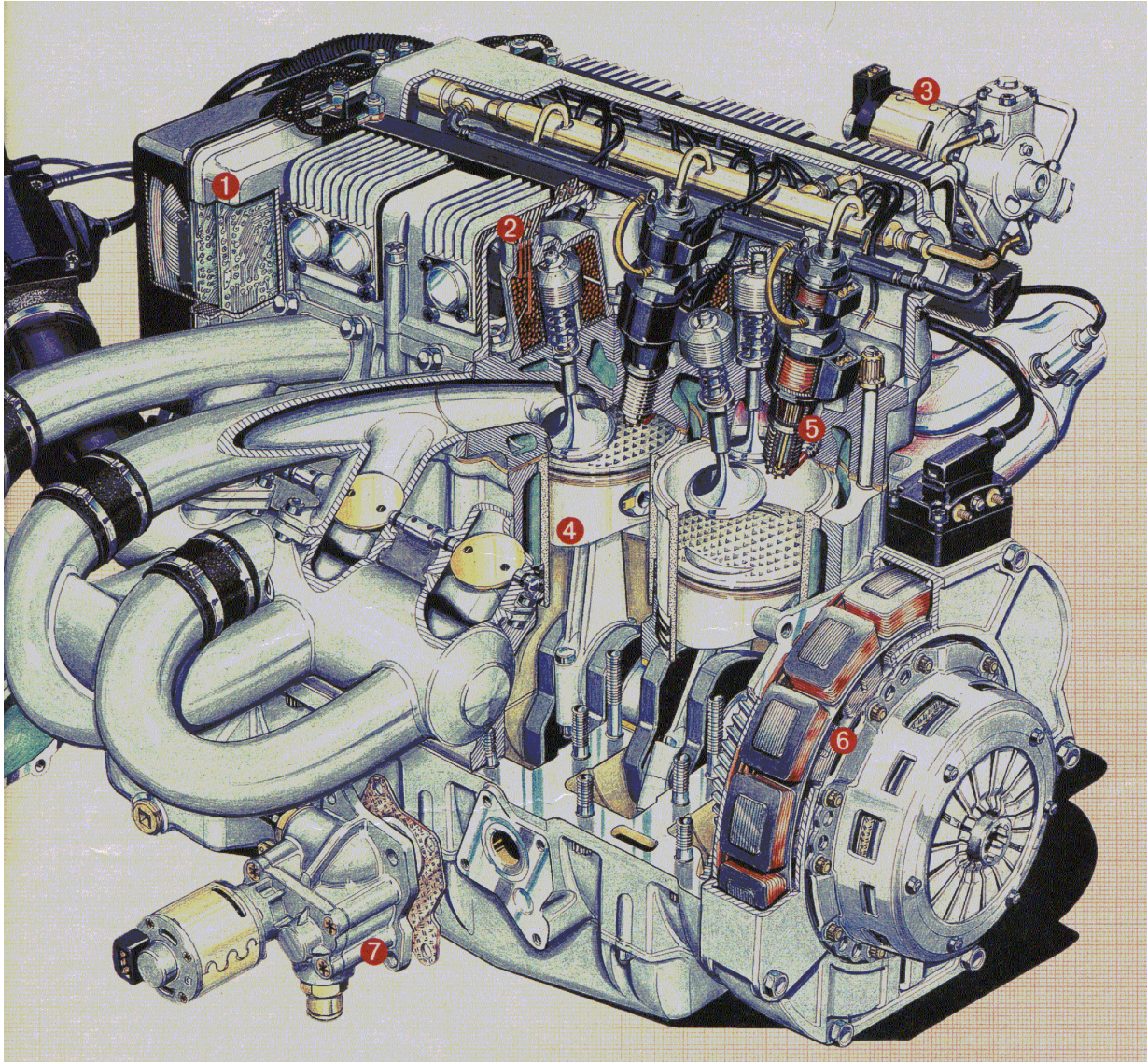


Fig. 21

**1: integrado electrónico, 2: regulación electromagnética de las válvulas, 3: bomba de combustible, 4: partes de cerámica, 5: inyección con encendido y bujía de precalentamiento, 6: arranque-generador acoplado al cigüeñal, 7: bomba eléctrica de aceite, 8: bomba eléctrica de líquido de refrigeración.**

## Capítulo VII - Análisis de la programación

Hasta ahora hemos visto las características, el funcionamiento y las consideraciones que hay que tener en cuenta de los motores de encendido por chispa con inyección directa que trabajan con mezclas pobres.

A continuación voy a desarrollar un programa bastante real para demostrar las principales características:

- Apreciable baja del consumo
- Aumento del rendimiento

La apreciable baja del consumo en este tipo de motor sólo se logra cuando el motor trabaja con bajas cargas, esto quiere decir cuando el auto circula a bajas velocidades, con poco peso y bajas r. p. m..

También hay una baja del consumo, obviamente menos apreciable, en alta, o sea, cuando el motor trabaja a casi o plena carga, debido al aumento de la relación de compresión.

La causa por la cual se observa la apreciable baja del consumo, es que el motor que trabaja con mezclas pobres realiza el control de la carga en forma cualitativa, o sea, que regula la cantidad de combustible sin variar la cantidad de aire que ingresa en el cilindro. Por lo tanto el ciclo comienza la fase de compresión, para cualquier estado de carga, cerca de la presión atmosférica.

En cambio un motor que trabaja con mezclas homogéneas la regulación de la carga se realiza en forma cuantitativa, esto quiere decir que la mezcla aire-combustible es siempre la misma y que varía la cantidad que ingresa en el cilindro. La mariposa en el conducto de admisión tiene la tarea de regular la cantidad de mezcla que ingresa en el cilindro pero también produce una depresión en el mismo, que crece a medida que la mariposa estrangula el paso de la mezcla (a medida que baja la carga).

En la programación que realizo a continuación voy a comparar el motor (N°1) de mi auto, un cuatro cilindros de encendido por chispa e inyección indirecta, 1600 cm<sup>3</sup>, 16v y 110 CV Din, con distintos motores (N°2, 3 y 4) de encendido por chispa de inyección directa y que trabajan con mezclas pobres que tienen las mismas características dimensionales que el motor de mi auto (misma cilindrada, mismo número y tamaño de válvulas, tamaño de colector de admisión y escape, **misma potencia**, etc.).

Los motores de inyección directa van a tener las siguientes características:

El N°2 tiene una relación de compresión de 12:1, que es la que utilizan los motores de inyección directa hoy en día.

El N°3 tiene una relación de compresión de 12:1 y está sobrealimentado; la sobrealimentación se usa principalmente en este caso para hacer trabajar al motor siempre con exceso de aire y alejarlo de la zona de generación de humo y evitar la utilización de la mariposa en dicha zona ( $\lambda < 1.5$ ).

El motor N°4 tiene una relación de compresión de 14:1, que es el límite con el cual el motor puede trabajar sin detonación; que representa el futuro.

El desarrollo del programa parte de la ecuación de estado de los gases y tiene las siguientes características:

### Considera:

- las pérdidas de calor
- la combustión no instantánea
- la posición de la mariposa
- la posición del acelerador
- el ángulo de avance de la combustión
- el ángulo de avance del encendido
- la forma real del proceso de combustión
- la depresión producida por la mariposa
- el trabajo de bombeo

### No considera:

- las pérdidas por rozamiento
- las pérdidas por no homogeneidad de la mezcla
- las pérdidas por avance al escape
- las pérdidas por fuga de masa por estanqueidad
- las pérdidas de calor por disociación en la combustión
- las pérdidas de calor producida por la inyección del combustible en la etapa de compresión
- las pérdidas por dilución de la mezcla fresca con gases de escape

Con el programa estudio seis casos, dos de potencia máxima que son los dos primeros y cuatro a media carga. Defino el estado de carga medio al estado del motor con el cual yo circulo con mi auto la mayor parte del tiempo en la ciudad todos los días. Dicho estado de carga de motor corresponde a una abertura de mariposa de 30° y un régimen de giro de 3000 r. p. m..

Después de realizar los cálculos para los distintos motores realice un cuadro donde los compare y resalte las cualidades de cada uno.

El programa lamentablemente no pudo ser verificado con el banco de motores de la facultad ya que el mismo cuenta con el sensor de presión de la cámara de combustión averiado.

### Resultados obtenidos

A continuación construyo una tabla comparativa con los datos obtenidos de los programas. Como se puede observar se verifica que el motor de encendido por chispa con inyección directa que trabaja con mezclas pobres (motores 2, 3 y 4) tienen un rendimiento considerablemente más alto cuando trabaja con bajas cargas que el motor que funciona con mezcla homogénea (motor 1). Lo que se traduce automáticamente en un menor consumo de combustible.

Obviamente que si se modifica el estado de carga disminuye también el consumo de combustible, por lo tanto varía según la forma de manejo. Voy a suponer que un auto circula la mitad del tiempo con cargas bajas y la otra mitad con cargas altas. Por eso defino el ahorro de consumo real a la mitad del obtenido con bajas cargas.

### Ahorro de consumo real:

- Motor 2: -17.1%
- Motor 3: -29.9%
- Motor 4: -18.7%

Estos datos coinciden con los proporcionados por los fabricantes de automóviles (Pág.43 y Automotive Engineering International).

Obviamente, si se conduce todo el tiempo con cargas altas el ahorro de consumo es menor y se encuentra en torno del 5-10%.

### Tabla comparativa:

Características	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Cilindrada / cm <sup>3</sup>	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Números de cilindros	4	4	4	4	4	4
Relación de compresión	10:01	12:01	10:01	12:01	12:01	14:01
Presión atmosférica	1bar	1bar	1bar	1bar	1bar	1bar
Temperatura ambiente	300° K	300° K	300° K	300° K	300° K	300° K
Rendimiento volumétrico	0.7	0.7	0.85	0.85	x	0.85
Porcentaje del caudal de admisión	100%	x	20%	x	x	x
Fracción de la posición del acelerador	x	0.96	x	0.15	0.104	0.146
Presión de sobrealimentación	x	x	x	x	1.2 bar	x
Presión en el cilindro al comienzo de la etapa de compresión	0.7 bar	0.7 bar	0.166 bar	0.83 bar	1.2 bar	0.83 bar
Revoluciones por minuto	5500	5500	3000	3000	3000	3000
Temperatura de los gases de escape	2009°K	1857°K	1736°K	500°K	499°K	480°K
Potencia	124.5	124.5	9.3	9.3	9.3	9.3
Rendimiento del motor	54.4%	56.7%	31.3%	42%	50%	43%
Reducción del consumo	x	4.2%	x	34.2%	59.7%	37.4%



## Conclusiones

Luego de observar los resultados de la tabla comparativa en el capítulo anterior en lo referente al consumo no cabe dudas *que los motores de encendido por chispa van a adoptar la inyección directa electrónica, la combustión de mezclas pobres y la cámara de combustión estratificada*. Es la única manera de aumentar el rendimiento de los motores de encendido por chispa en forma apreciable.

*La baja del consumo es variable según el estado de carga del motor, o sea según la forma de manejo y del peso del vehículo*. A menor carga la baja del consumo es bastante apreciable en comparación con la inyección indirecta. Con cargas alta no.

La causa principal del ahorro de combustible es que el motor de inyección directa aspira siempre la misma cantidad de aire para un número determinado de revoluciones y comienza la etapa de compresión sin variación de la presión en el cilindro con respecto a la atmosférica. En otras palabras la relación de compresión que es el factor más importante de la ecuación del rendimiento, permanece casi constante.

Si el control de la carga lo realiza la válvula mariposa, como en el caso del motor de inyección indirecta, la depresión de admisión que varía según la posición de la mariposa afecta el coeficiente de llenado, lo que equivale en los hechos a una presión menor al comienzo y fin de la etapa de compresión.

Esto quiere decir que el motor que trabaja con mezclas homogéneas varía la presión interna del cilindro al comienzo de la etapa de compresión según el estado de carga, en cambio el motor que trabaja con mezclas pobres no lo hace. *Por lo tanto el motor que trabaja con mezclas pobres va a tener siempre un mayor rendimiento que el motor que trabaja con mezclas homogéneas para cualquier estado de carga que no sea el máximo*.

Cuando los dos motores trabajan con cargas altas la baja del consumo en el motor de inyección directa se produce porque éste tiene mayor relación de compresión. Adicionalmente puede funcionar con relaciones de compresión más alta porque la inyección del combustible se realiza en el último momento antes de que salte la chispa con lo cual el combustible tiene el tiempo justo para evaporarse y no para auto inflamarse.

La respuesta del motor es mejor porque el control de carga actúa directamente en la cámara de combustión. Hay menos retraso entre la demanda del conductor y la aceleración debido a que el tiempo de llenado del colector de admisión entre la mariposa y la cámara de combustión se ha eliminado.

En la actualidad el costo de este sistema es ligeramente más caro que el de inyección indirecta, pero cuando se imponga va a ser menor por la sencillez que presenta.

El motor de encendido por chispa de inyección directa y cámara de combustión estratificada se diferencia del motor de encendido por compresión sólo por la mayor relación de compresión de éste último y por la forma de provocar el encendido de la mezcla.

La desventaja principal de la inyección directa es la tecnología adicional que se requiere para el posterior tratamiento de los gases de escape y que como se aclaró oportunamente en el capítulo de emisiones nocivas todavía presenta dificultades técnicas.

Finalmente otra desventaja importante es la limitada y costosa disponibilidad de combustible sin azufre.

## Bibliografía

- AUTO MOTOR UND SPORT: *Technik*. Auto Motor und Sport, Stuttgart 1996-2002.
- CASANOVA KINDELAN JESÚS: *Ciclos de trabajo de los motores. Ciclos teóricos*. Master en Ingeniería de vehículos automotores, Universidad de Belgrano, Buenos Aires. (1)
- COLIN R. FERGUSON: *Internal Combustion Engines*. John Wiley & Sons Inc. New York 1986. (2)
- DANTE GIACOSA: *Motores endotérmicos*. Ediciones Omega, Barcelona 1988. (3)
- HEINZ GROHE: *Otto und Dieselmotoren*. Vogel, Würzburg 2000. (4)
- JOST KEVIN: *Tendencias en los motores de encendido por chispa*. Automotive Engineering International, Madrid, N° 2, Enero-Febrero 2002.
- MUÑOZ MANUEL. PAYRI FRANCISCO. SIMPSON J.R.: *Combustión en los motores de encendido provocado*. Master en Ingeniería de vehículos automotores, Universidad de Belgrano, Buenos Aires. (5)
- MUÑOZ TORRALBO MANUEL: *Introducción al estudio de los motores de combustión interna alternativos*. Master en Ingeniería de vehículos automotores, Universidad de Belgrano, Buenos Aires. (6)
- NOLASCO BETHENCOURT ANTONIO: *Sobrealimentación por turbina de escape*. Master en Ingeniería de vehículos automotores, Universidad de Belgrano, Buenos Aires. (7)
- R. MARTINEZ DE VEDIA: *Teoría de los motores térmicos*. Editorial Alsina, Buenos Aires 1989. (8)



