

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Revisión del Estado Actual de los Motores de  
Combustión Interna Alternativos de Inyección  
Directa

Autor: Gonzalo Gago Bachiller

Tutor: Miguel Torres García

Dep. de Ingeniería Energética  
Grupo de Máquinas y Motores Térmicos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



**GMTS** | GRUPO DE MAQUINAS Y MOTORES  
TÉRMICOS DE SEVILLA

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Revisión del Estado Actual de los Motores de Combustión Interna Alternativos de Inyección Directa**

Autor:

Gonzalo Gago Bachiller

Tutor:

Miguel Torres García

Dep. de Ingeniería Energética  
Grupo de Máquinas y Motores Térmico  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Revisión del Estado Actual de los Motores de Combustión Interna Alternativos de Inyección Directa

Autor: Gonzalo Gago Bachiller

Tutor: Miguel Torres García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mi tutor*

# AGRADECIMIENTOS

---

Me gustaría dar las gracias a mi familia, por poner todos los medios para que esto fuera posible, además del apoyo constante e incondicional. También a todos mis amigos y compañeros de viaje durante estos últimos años en Sevilla y Valencia, con ellos, todo ha sido más fácil. Por último agradecer la formación recibida de todos mis profesores a lo largo de estos últimos años.

*Gonzalo Gago Bachiller*

*Sevilla, 2017*

# RESUMEN

---

Ya desde la temprana aparición del motor de combustión interna alternativo, el sector automovilístico se ha encontrado muy ligado a este. Su mejora a lo largo de los años, han producido un desarrollo mundial en diversos sectores, y con ello una expansión de su uso. La gran demanda automovilística desarrollada en los últimos 50 años, ha provocado un aumento en las exigencias medioambientales. Esto ha traído consigo numerosas propuestas de desarrollo en los motores, para adaptarse a las diferentes normativas y exigencias requeridas. Cabe destacar el gran impulso de la inyección directa de combustible, que ha traído consigo numerosas mejoras en diferentes partes y aspectos del motor. En este texto, presentado a continuación, se describirán los diferentes tipos de motores, tanto diesel como gasolina, su funcionamiento, su clasificación en cuanto a sistemas de inyección, las mejoras desarrolladas y aplicadas en estos durante los últimos años y, por último, los sistemas de tratamiento de gases de escape necesarios para alcanzar las restricciones de la normativa.

# ABSTRACT

---

Since the early appearance of the internal combustion engine, the automobile sector has been closely linked to this. Its improvement over the years, have produced a global development in various sectors, and with it an expansion of its use. The high demand for automotive industry developed in the past 50 years, has led to an increase in environmental requirements. This has brought many proposals for development in the engines, to adapt to the different legislation and requirements. We would like to highlight the large momentum of the direct fuel injection, which has brought many improvements in different parts and aspects of the engine. In this text, presented below, describe the different types of engines, with both diesel and petrol, its operation, its classification in terms of injection systems, the improvements developed and applied in these over the last few years and, finally, the systems of treatment of exhaust gases necessary to meet the restrictions of the regulations.

# ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Índice</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Historia del motor de combustión interna alternativo</i>	2
<b>2 Tipología en los MCI</b>	<b>4</b>
<b>3 La Inyección de Combustible</b>	<b>8</b>
3.1 <i>El carburador</i>	9
3.2 <i>Clasificación de los sistemas de inyección</i>	10
<b>4 la Inyección Directa en Mec</b>	<b>15</b>
4.1 <i>Caracterización del MEC</i>	15
4.2 <i>Desarrollo de la inyección directa en MEC</i>	16
4.3 <i>Clasificación de los sistemas de inyección directa en MEC</i>	17
<b>5 La Inyección Directa en Mep</b>	<b>19</b>
5.1 <i>Resurgimiento e importancia en la actualidad</i>	19
5.2 <i>Caracterización del MEP de inyección directa</i>	22
5.3 <i>Relación aire-combustible y su influencia</i>	23
5.4 <i>Procesos de combustión</i>	25
5.5 <i>Modos de operación</i>	25
5.6 <i>Sistemas de combustión</i>	28
5.6.1 <i>Sistemas de combustión de primera generación</i>	28
5.6.2 <i>Sistemas de combustión de segunda generación</i>	29
5.7 <i>Ventajas e inconvenientes inyección directa frente a indirecta</i>	30
<b>6 Tecnologías Aplicadas a los Motores de la Actualidad</b>	<b>33</b>
6.1 <i>Inyección directa con mezcla pobre (LBDI)</i>	34
6.1.1 <i>Principio de funcionamiento</i>	34
6.1.2 <i>Ventajas e inconvenientes</i>	35
6.2 <i>Distribución de válvulas variable</i>	35
6.3 <i>Combustión por difusión a baja temperatura (LTC)</i>	36
6.3.1 <i>Combustión convencional en MEC</i>	37
6.3.2 <i>Combustión diesel a baja temperatura no simultánea a la inyección</i>	38
6.3.3 <i>Combustión diesel a baja temperatura simultánea a la inyección</i>	39
6.4 <i>HCCI/CAI</i>	39
6.4.1 <i>Principio de funcionamiento</i>	40
6.4.2 <i>Ventajas e inconvenientes</i>	41
6.4.3 <i>Control HCCI</i>	42
6.5 <i>Recirculación de gases de escape (EGR)</i>	43
6.5.1 <i>Características del sistema</i>	44

6.5.2 Tipos de circuitos EGR	45
<b>6.6 Sobrealimentación en MCI</b>	<b>49</b>
6.6.1 Tipos de sobrealimentación	49
<b>6.7 Motores de gas natural de inyección directa</b>	<b>56</b>
6.7.1 Desarrollo del motor	56
6.7.2 Relación de compresión	57
6.7.3 Almacenamiento y suministro del combustible	57
6.7.4 Encendido del combustible	58
6.7.5 Combustión	59
6.7.6 Emisiones	59
6.7.7 Ventajas e inconvenientes	59
<b>6.8 Aplicación de biocombustibles</b>	<b>60</b>
6.8.1 Biodiesel	61
6.8.2 Bioetanol	61
6.8.3 Ventajas e inconvenientes	61
<b>7 Control de Emisiones</b>	<b>63</b>
7.1 Emisiones características en un MCI	63
7.2 Sistemas de reducción de emisiones	65
7.2.1 Sistemas empleados en MEP	65
7.2.2 Sistemas empleados en MEC	68
7.3 Legislación	69
<b>8 El MCI en el Mercado Automovilístico Actual</b>	<b>71</b>
8.1 Aparición del Downsizing	71
8.2 Desarrollo y futuro del HCCI / CAI	75
8.3 Desarrollo y futuro del LBDI	75
8.4 El motor de gas natural en la automoción	77
<b>Conclusiones</b>	<b>80</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>

# INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Evolución de los sistemas de inyección en MEC	8
Tabla 2: Datos de las restricciones impuestas por las normativas Euro y sus fechas de entrada en vigor	70
Tabla 3: Principales modelos de motor que han aplicado downsizing (parte 1)	73
Tabla 4: Principales modelos de motor que han aplicado downsizing (parte 2)	74

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 2-1: Ciclo de 4T en un MCI	4
Ilustración 2-2: Ciclo de 2T en un MCI	5
Ilustración 2-3: Motor refrigerado por aire mediante aletas	5
Ilustración 2-4: Sistema de refrigeración por agua en un MCI	6
Ilustración 2-5: Distribuciones constructivas características de los cilindros de un MCI	6
Ilustración 2-6: Aspiración natural (izquierda), sobrealimentación (derecha)	7
Ilustración 3-1: Mercedes 300SL	9
Ilustración 3-2: Esquema y curvas características del carburador	10
Ilustración 3-3: Esquema del sistema monopunto	11
Ilustración 3-4: Esquema del sistema multipunto	12
Ilustración 3-5: Procesos de inyección multipunto	13
Ilustración 3-6: Inyección directa (izquierda), inyección indirecta (derecha)	13
Ilustración 4-1: Esquema característico de un MEC	15
Ilustración 4-2: Esquema sistema Common Rail (Bosch)	18
Ilustración 4-3: Esquema sistema inyector-bomba (Bosch)	18
Ilustración 5-1: Mitsubishi Galant GDI	19
Ilustración 5-2: Volkswagen Lupo 1.4 FSI	20
Ilustración 5-3: Opel Vectra 2.2 Ecotec	20
Ilustración 5-4: Evolución de vehículos de gasolina de inyección directa matriculados sobre el total de vehículos gasolina en España	21
Ilustración 5-5: Emisión media de CO <sub>2</sub> (g/km) en turismos de gasolina matriculados	21
Ilustración 5-6: Factores que afectan al ahorro de combustible de un motor GDI frente a un PFI	22
Ilustración 5-7: Esquema típico motor gasolina inyección directa (Bosch)	23
Ilustración 5-8: Influencia de $\lambda$ en la potencia y consumo del motor	24
Ilustración 5-9: Influencia de $\lambda$ en emisiones contaminantes	24
Ilustración 5-10: Procesos de combustión homogéneo y estratificado	25
Ilustración 5-11: Modos de operación en el mapa de motor	26
Ilustración 5-12: Inyección y combustión en los diferentes modos de operación	27
Ilustración 5-13: Sistemas de guiado de primera generación	28
Ilustración 5-14: Esquema del sistema de guiado por chorro	29
Ilustración 6-1: Mapa de funcionamiento de LBDI	34
Ilustración 6-2: Sistema VTEC de Honda de distribución de válvulas variable	36
Ilustración 6-3: Regiones principales de formación de NO <sub>x</sub> y hollín	37

Ilustración 6-4:Diagrama distribución del proceso combustión convencional diesel: NOx y PM	38
Ilustración 6-5:Diagrama LTC: reducción emisiones NOx y PM	39
Ilustración 6-6:Modos de combustión	41
Ilustración 6-7:Proceso combustión HCCL vs diesel convencional: Disminución en NOx y PM	42
Ilustración 6-8:Efecto del EGR sobre la emisión de NOx y PM	45
Ilustración 6-9: Esquema motor con EGR de alta presión	46
Ilustración 6-10:Esquema motor con EGR de baja presión	47
Ilustración 6-11Esquema motor con EGR híbrido	48
Ilustración 6-12: Influencia del EGR(%) en emisiones y consumo	48
Ilustración 6-13: Esquema sobrealimentación mecánica	50
Ilustración 6-14: Mapa y línea de operación del compresor mecánico	50
Ilustración 6-15:Par motor: Aspiración natural, sobrealimentación mecánica	51
Ilustración 6-16: Esquema básico de la turbosobrealimentación de un motor	52
Ilustración 6-17: Mapa y línea de operación de un turbocompresor	53
Ilustración 6-18: Turbocompresores de una etapa (izquierda), dos etapas con refrigeración (derecha)	54
Ilustración 6-19:Mapa de funcionamiento de un turbocompresor secuencial	54
Ilustración 6-20: Comparación de tipos de sobrealimentación	55
Ilustración 6-21:Sistema de suministro en un motor de gas natural	58
Ilustración 7-1: Principales emisiones en MEP y MEC	63
Ilustración 7-2: Proceso de ventilación de vapores del cárter	65
Ilustración 7-3: Filtro canister	66
Ilustración 7-4: Esquema típico de un catalizador de tres vías	66
Ilustración 7-5: Rango de funcionamiento óptimo del catalizador de 3 vías	67
Ilustración 7-6: Trampa de NOx	68
Ilustración 7-7: Esquema del filtro de partículas en un MEC	68
Ilustración 7-8: Esquema del funcionamiento del SCR	69
Ilustración 8-1: Motor EcoBoost 1.0 Ford 2012	73
Ilustración 8-2: Opel Vectra 2.2L HCCI	75
Ilustración 8-3: Modos de funcionamiento del M274 2.0L BlueDIRECT	76
Ilustración 8-4: Aplicaciones potenciales en el motor M274 de Mercedes-Benz y su mejora en las emisiones de CO <sub>2</sub>	77
Ilustración 8-5: Comparación competitiva de rendimiento y consumo del E-Class NGD	77
Ilustración 8-6:Número de vehículos de gas natural matriculados en España	78
Ilustración 8-7:Consumo vehículos de gas natural en España	78
Ilustración 8-8: Diferentes modelos de vehículos propulsados por gas natural	79

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El motor de combustión de interna alternativo, ya desde sus inicios, ha tenido un amplio rango de uso para diversas aplicaciones relacionadas con la producción de potencia. Desde su aparición en el año 1876 hasta la actualidad, no se ha parado de invertir en investigación y en mejoras en él. Puede destacarse su aplicación en:

- Generación de energía eléctrica ( motores usados en plantas térmicas , de cogeneración etc que accionan generadores eléctricos desde potencias menores a 1 kW hasta potencias mayores de 80 MW),
- Sistemas de propulsión ( principalmente automóviles, pero también vehículos agrícolas y de obras públicas, ferroviaria, aérea etc),
- Otras aplicaciones ( como motobombas, moto sierras ,otras herramientas motorizadas etc).

A partir de los años 1950, comienza a desarrollarse en California una cierta preocupación por las emisiones gaseosas producidas por los motores de combustión interna alternativos de automoción y aparecen las primeras normativas para su regulación en dicho estado. Posteriormente, estas normativas se extienden al resto de EEUU y otros países como Japón y más tarde a Europa. Las sucesivas crisis del petróleo de 1973 y 1979 y la preocupación asociada por el posible agotamiento del petróleo, así como la contaminación atmosférica producida por el desarrollo de estos motores , no sólo en el campo de la automoción, sino también en otros campos, da lugar a la mejora de la potencia específica (kW/l), y más adelante al consumo específico y a la disminución de emisiones gaseosas y sonoras. Así, la normativa que regula estos parámetros ha ido haciéndose cada vez más restrictiva y ha supuesto un gran reto para la industria del motor , ya que la mejora en el aumento de potencia, junto con una disminución de las emisiones y del consumo, es algo que conjuntamente es difícil de llevar a cabo.

Las fuertes normativas actuales sobre regulación de contaminantes y de emisiones gaseosas, han provocado una fuerte inversión y puesta en marcha del desarrollo del ya conocido motor de inyección directa. En los últimos años, y sobre todo en Europa, la tendencia a seguir por los fabricantes de automóviles ha sido clara: reducir el consumo de combustible y las emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). Para ello, se ha dejado de lado el desarrollo de la inyección indirecta en motores de gasolina, para dar lugar al potente desarrollo de la inyección directa en estos tipos de motores. Además, ya se aplica la inyección directa en motores diesel desde hace tiempo. Con la llamada era de la dieselización, (desarrollada aproximadamente a finales de los años 80) existió una fuerte inversión que condujo al desarrollo de este tipo de motor y a su uso de forma mayoritaria en Europa. Teniendo en cuenta todo esto, actualmente se ha apostado por desarrollar tecnologías (sobre todo en motores gasolina) más eficientes y limpias , ya que el desarrollo actual del diesel se encuentra en su última etapa. Para ello, reducir la cilindrada y sobrealimentar, para mantener la potencia del motor ha sido la tendencia más seguida.

Cabe destacar también , la fuerte apuesta por sistemas de control y reducción de contaminantes empleados actualmente en las diversas tecnologías (tanto diesel como gasolina). Estos son muy necesarios para el cumplimiento de las diferentes normativas , por lo tanto cualquier motor actual, lleva incorporado al menos un par o tres sistemas de reducción de contaminantes.

El principal objetivo de este trabajo es tratar de completar e informar sobre las diferentes formaciones en este campo. No trata por tanto de presentar nada nuevo, sino de presentar de manera estructurada y ordenada las diferentes estrategias de inyección directa seguidas en los motores de la actualidad, recopiladas de diferentes referencias bibliográficas para integrarlas en un solo documento informativo de carácter académico. Los objetivos del trabajo son:

- Realizar un estudio y revisión de las diferentes tecnologías empleadas actualmente tanto en los motores de

4T de gasolina , como en los motores diesel, ambos de inyección directa. El desarrollo de menor a mayor complejidad de estas, sus modos de funcionamiento y su aplicación combinada o no, en los motores de automoción de la actualidad. También se destacarán las diferentes tecnologías de control de contaminantes que hay que emplear junto con estas tecnologías de automoción para que estas puedan cumplir los requisitos mínimos de legislación, y así poder aparecer en el mercado automovilístico.

- Recopilar toda esa información en un documento que sirva para ampliar el conocimiento sobre este campo a todas aquellas personas interesadas en él , pero particularmente dedicado a los alumnos de Grado en el campo de motores de combustión interna alternativos.

## 1.1 Historia del motor de combustión interna alternativo

Los orígenes de los motores son muy remotos, en especial si se consideran los inicios o precedentes de algunos elementos constructivos de los motores, imprescindibles para su funcionamiento. Existen algunos ejemplos de motores desarrollados antes del siglo XIX, pero a partir de la producción comercial del petróleo a mediados del siglo XIX ( 1850) comienzan a desarrollarse mejoras muy interesantes e importantes. A finales de ese siglo se conocerían multitud de variedades de motores utilizados en todo tipo de aplicaciones. Algunos de estos precedentes son el sistema biela-manivela empleado en los molinos de agua romanos en una serrería de Hierápolis, la descripción por Leonardo da Vinci del motor atmosférico o la teoría de la termodinámica publicada por el físico francés Sadi Carnot. Con estos ejemplo y algunos más, se pudo conjugar parte de los primeros motores desarrollados a finales de los años 1860.

El primer motor de combustión interna alternativo desarrollado con éxito fue el fabricado por el belga Jean Joseph Etienne Lenoir en el año 1860, fue el primer motor con cilindros, pistones, bielas y volantes construido en cantidades importantes. No era un motor muy eficiente, pero incluía una bujía para el encendido de la mezcla. Este motor, que se movía gracias al gas de carbón mezclado por aire, fue de tipo experimental y dio lugar para que otros ingenieros profundizaran en los motores de explosión que vendrían después.

Hacia 1867 , el ingeniero alemán Nikolaus August Otto, ayudado por su auxiliar mecánico E. Langen, desarrolló un motor de combustión que superaba ligeramente el de Lenoir, aprovechándose de un pistón libre para generar trabajo, pero seguía siendo un motor atmosférico. Otto continuó con su trabajo de investigación y en el año 1876 logró construir el primer motor de cuatro tiempos de la historia. Este motor, utilizaba los principios descritos por De Rochas, con una carrera para la admisión de aire y gas carbón, luego otra para la compresión, y después de una explosión se producía la carrera de expansión. Pese haber sido el primero en construir este tipo de motores, su patente fue demandada y le fue denegada su validez en Alemania hacia 1884. A pesar de esto, la historia le atribuye los méritos a Otto, justificando este hecho en que fue el primero en construirla.

El interés por hacer y mejorar motores de combustión caló en Europa y más adelante George Brayton inventó en Gran Bretaña el ciclo y motor que lleva su nombre, movido por queroseno. Más adelante, el alemán Rudolf Diesel presentó una variante del motor de combustión interna alternativo, conocido como el motor Diesel, desarrollado durante los años 1893 y 1898; Consistía en utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro, lo que permitió hasta doblar la eficiencia sobre otros motores de combustión interna de la época, mediante relaciones de compresión mayores, evitando la auto-detonación, que era el principal problema que tenían hasta entonces los motores tipo Otto, los cuales no superaban la relación de compresión de 4:1.

Poco a poco, y con el paso de los años el motor diesel fue ganando terreno, especialmente en líneas de largo recorrido.

Cabe destacar la aparición del motor de combustión interna rotativo Wankel , probado con éxito en el año

1957 tras años de investigación y desarrollo, basado en los planos del inventor alemán Felix Wankel.

Los combustibles también han tenido gran importancia en el desarrollo de los motores. Los primeros quemaban gas de carbón para generar potencia mecánica. La gasolina y los derivados del petróleo comenzaron a usarse más adelante gracias a la aparición de varios tipos de carburadores desarrollados para vaporizar el combustible y mezclarlo con aire.

Entre los años 1907 y 1915, la demanda de gasolina aumentó, y se tuvo que desarrollar un nuevo sistema de obtención de crudo, para cubrir la demanda de gasolina, pero sus altos puntos de ebullición crearon problemas de arranque en frío, que más tarde fueron solucionados con la aparición del encendido eléctrico en 1912.

Los siguientes períodos relacionados con la Primera y Segunda Guerra Mundial, condujeron al desarrollo de ciertos estudios para mostrar mejoras acerca de la combustión, en especial el problema de la auto detonación del combustible. General Motors desarrolló ciertos aditivos para evitar la detonación del combustible hacia el año 1923.

A partir de aquí, y hasta la actualidad, han surgido dos nuevos factores que afectan significativamente al diseño y desempeño del motor:

- El control de las emisiones contaminantes.
- La reducción del consumo de combustible.

El control de emisiones y estas mejoras en los combustibles han producido significativos cambios en los parámetros de operación y diseño de los motores.

Actualmente, se han realizado muchas investigaciones sobre el uso de combustibles alternativos al diesel y a la gasolina, entre ellos destacan el gas natural, el etanol, el metanol, los combustibles no derivados del petróleo (origen vegetal), la gasolina sintética y el hidrógeno.

Como valoración general, es interesante ver cómo apenas se ha producido un gran incremento en el rendimiento (11-50%) de estos motores durante los aproximadamente 150 años de historia, a pesar de los avances tecnológicos existentes hoy en día.

## 2 TIPOLOGÍA EN LOS MCIA

A continuación, se realizará una clasificación de los motores de combustión interna alternativos, según los aspectos más significativos:

- Según el proceso de ignición o encendido: motores de encendido provocado o por chispa (MEP o MECH) y motores de encendido por compresión (MEC).
  - En los MEP, normalmente se ha venido disponiendo de una mezcla de aire y combustible prácticamente homogénea y el proceso de combustión se realiza gracias a la chispa de una bujía, dando paso a la formación y propagación de un frente de llama en la cámara de combustión.
  - En los MEC, se admite gran cantidad de un fluido, que normalmente es aire, sometido a una fuerte presión de forma que se garantiza la auto inflamación del combustible cuando este entre en cantidades menores normalmente al final del proceso de compresión.
- Según el ciclo termodinámico que se realice: ciclo de cuatro tiempos o ciclo de dos tiempos.
  - El ciclo de cuatro tiempos se llama así, porque el motor requiere de cuatro carreras del émbolo, es decir, dos revoluciones del motor, para realizar el ciclo termodinámico completo, dividido en carrera de admisión, carrera de compresión, carrera de expansión (explosión) y carrera de escape. En estos motores, la renovación de la carga se realiza a través de la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape.

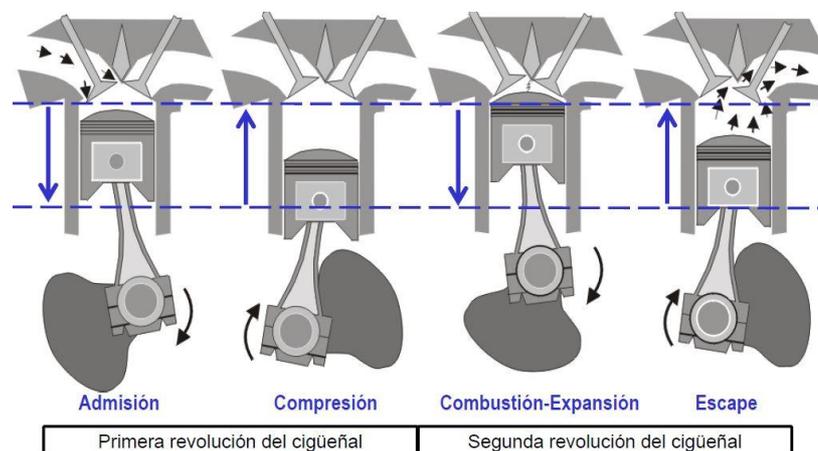


Ilustración 2-1: Ciclo de 4T en un MCIA

-En el ciclo de dos tiempos, ocurren las mismas cuatro fases, pero en sólo dos carreras del émbolo, es decir, en una sola revolución del cigüeñal. La renovación de la carga se realiza por el llamado proceso de "barrido", que consiste en desplazar la mezcla de los gases de la combustión previa, sin necesidad de válvulas, ya que es el propio émbolo el que con su movimiento descubre las lumbreras de admisión y escape regulando el proceso.

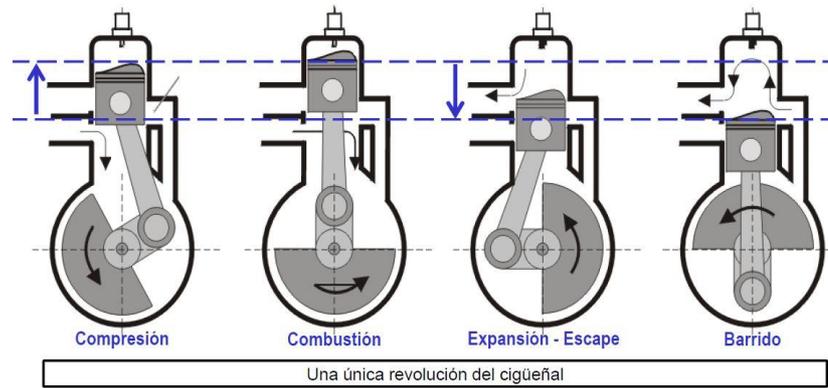


Ilustración 2-2: Ciclo de 2T en un MCI

- Según el tipo de refrigeración en el motor: refrigeración por agua o por aire.
  - Comúnmente los automóviles están refrigerados por agua, e incorporan un ventilador que se activa automáticamente cuando el coche está a ralentí o parado. La refrigeración por aire necesita de aletas en la superficie del motor además de una geometría poco compacta y más simple mecánicamente. En la refrigeración por agua, el motor cede calor al líquido refrigerante a través de un sistema de refrigeración. En algunos casos también es necesario la refrigeración del propio aceite.

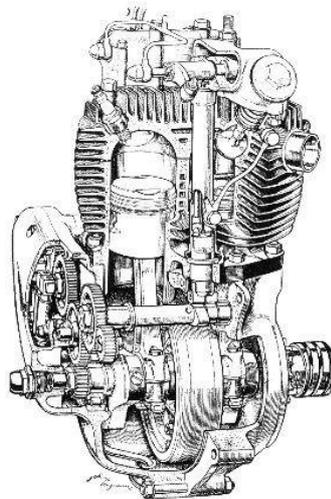


Ilustración 2-3: Motor refrigerado por aire mediante aletas

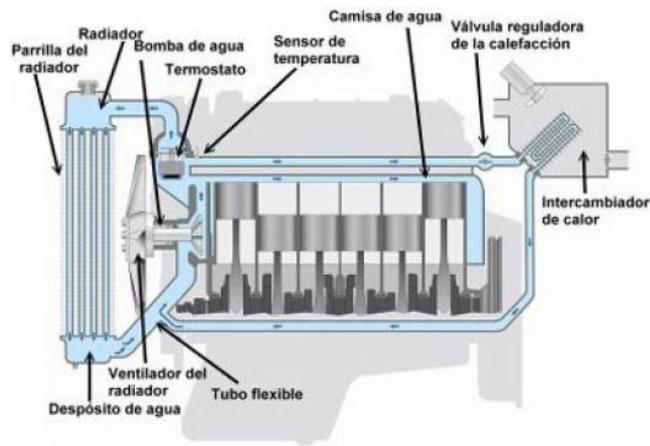


Ilustración 2-4: Sistema de refrigeración por agua en un MCI

- Según la disposición constructiva, las formas más comunes de disposición de cilindro son en línea, en V, opuestos(boxer) y en estrella(radial). El número de cilindros vendrá determinado por la potencia que requiera el motor.

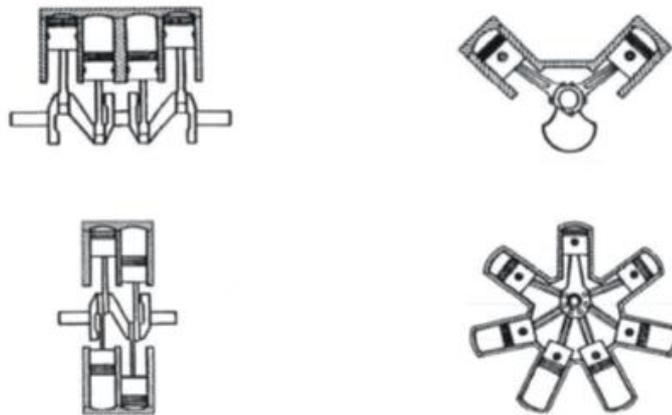


Ilustración 2-5: Distribuciones constructivas características de los cilindros de un MCI

- Según la presión de admisión: atmosféricos o sobrealimentados.
  - Los motores atmosféricos son aquellos en los que el aire entra al motor aproximadamente a la presión atmosférica mientras que en los sobrealimentados el aire entra a una presión mayor a la atmosférica, gracias al uso de un compresor. En la actualidad, la mayoría de motores están sobrealimentados, para poder así reducir el tamaño del motor entre otras ventajas.

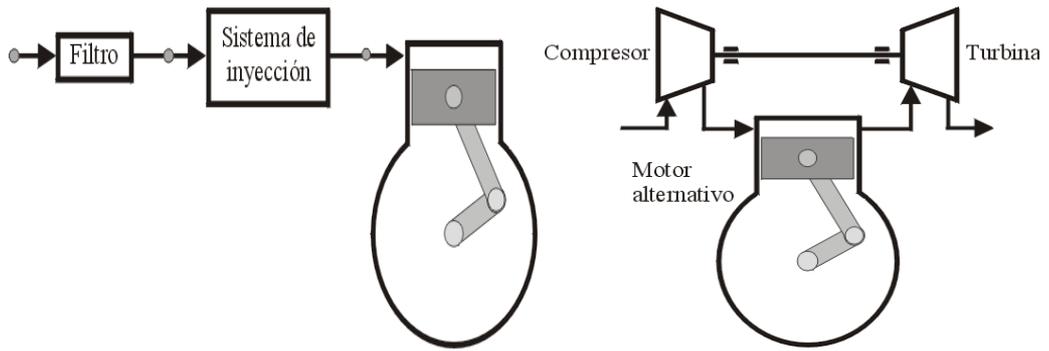


Ilustración 2-6:Aspiración natural (izquierda), sobrealimentación (derecha)

# 3 LA INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE

La principal misión de la inyección de combustible es, introducir el combustible, a través de un carburador o inyector, a la cámara de combustión, de forma que este pueda ser usado en el proceso de generación de energía. El desarrollo de la inyección ha venido ligado con los inicios de los motores de combustión interna alternativos. Aunque se realizaron diversas pruebas a finales del siglo XIX, sus inicios en el desarrollo en la práctica se remontan a motores estacionarios. La aviación fue la primera en usar la inyección de combustible en sus motores. El motor de cuatro tiempos y cuatro cilindros del Flyer I construido por los hermanos Wright en 1903 utilizaba un sistema de inyección de combustible de baja presión en la cámara de combustión.

En 1922, el técnico alemán Robert Bosh decidió desarrollar su propio sistema de inyección para motores Diesel. En 1925 consiguió culminar su proyecto con la bomba de inyección en línea y en 1927 comenzó la fabricación en serie de ésta.

La siguiente tabla muestra la línea temporal seguida en el desarrollo de los sistemas inyección en diesel hasta la actualidad:

1927: Primera bomba inyectora en línea de serie.	1962: Primera bomba inyectora distribuidora de pistón axial EP-VM.	1986: Primera bomba inyectora distribuidora de pistón axial con regulación electrónica	1994: Primer sistema de unidad inyectora (UIS) para vehículos utilitarios.
1995: Primer sistema de bomba unitaria (UPS).v	1996: Primera bomba inyectora distribuidora de pistón radial	1997: Primer sistema de inyección de presión modulada Common Rail.  1ª generación con presión de inyección de 1350 bar.	1998:Primer sistema de Unidad Inyectora (UIS) para automóviles.
2001: 2ª generación del sistema Common Rail con presión de inyección de 1600 bar.	2002: 2ª generación del sistema Common Rail mejorada; menor consumo y mejor desempeño.	2003: 3ª generación del sistema Common Rail, con inyectores piezo en línea, 1600 bar de presión de inyección y un 20% menos de emisiones.	2004: 1ª generación dNOx para Euro 4.
2005: Inyector Piezo Common Rail. 3ª generación con presión de inyección de 1800 bar.	2006: Bomba CP4 Common Rail con presión de inyección de 1800 bar. 2ª generación dNOx para Euro 5	2008: 4ª generación del Common Rail con presión de inyección de hasta 2100 bar.	2011: Primeros vehículos en cumplir Euro 6 con la tecnología "Clean Diesel".

Tabla 1: Evolución de los sistemas de inyección en MEC

Tras la Primera y Segunda Guerra Mundial, y tras años de especulación sobre el uso de inyectores o carburador, en el año 1952 se inicia la experimentación de la inyección de combustible en un motor de cuatro tiempos de automoción: el motor del Mercedes 300SL.



Ilustración 3-1:Mercedes 300SL

A partir de aquí se produce un desarrollo constante de la inyección, donde cada vez los inyectores alcanzan unas mayores presiones de inyección, necesarias para el ahorro de combustible y una combustión más eficiente.

Este sistema de alimentación de los motores de combustión interna, comienza a reemplazar casi por completo a todos los automóviles europeos con carburador a partir de 1990. Esto es debido a la obligación de reducir las emisiones contaminantes y a una mayor eficiencia por parte de los inyectores.

Las mejoras en el sistema de inyección han estado ligadas al avance en el desarrollo de los MEC, ya que básicamente, su incremento en potencia y rendimiento ha venido dado por el aumento de la presión de inyección.

### 3.1 El carburador

Sistema en desuso. Sus mayores inconvenientes proceden de su inexactitud en el control de la regulación y dosificación de la mezcla, lo cual provoca un mayor consumo de combustible y una mayor emisión de partículas contaminantes, para una misma potencia suministrada por el motor, respecto a otro alimentado con un sistema de inyección.

Su desaparición como sistema de alimentación en la automoción, se debió sobre todo a la legislación anticontaminación, que obligó al empleo de catalizadores para depurar los gases residuales. Estos precisan de un control estricto de la dosificación para evitar su deterioro. En motocicletas se sigue empleando, aunque cada vez también menos.

A pesar de los inconvenientes citados, se trata de un sistema de gran precisión, con gran complejidad interna, y teniendo en cuenta sus limitaciones, con unos resultados sorprendentes. No obstante, siempre es superado por cualquier sistema de inyección. En lo que aún no ha sido superado es en sencillez como conjunto, y en su nula dependencia del empleo de la corriente eléctrica y de la electrónica. Es un sistema puramente mecánico.

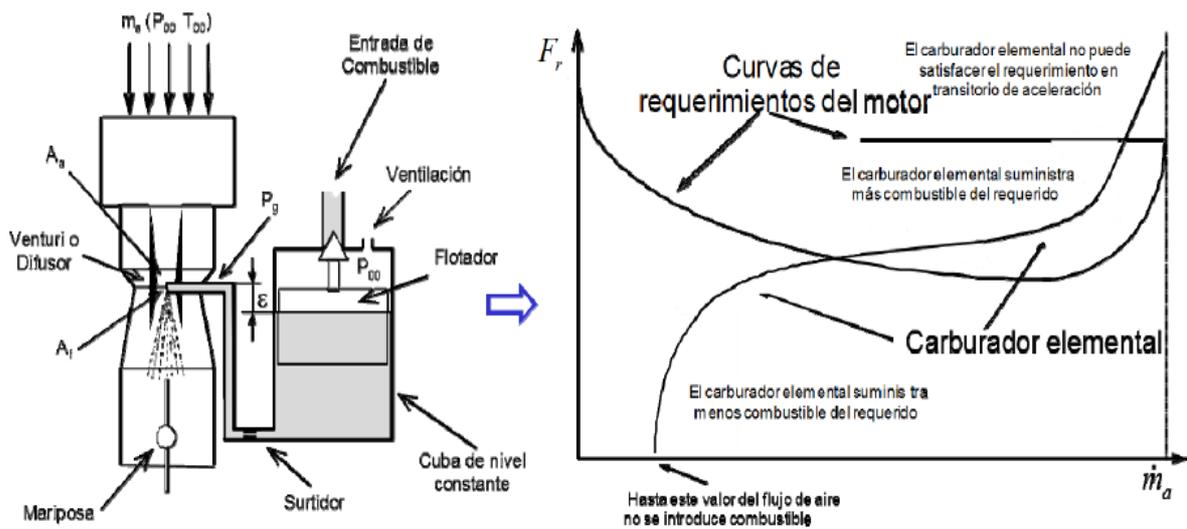


Ilustración 3-2: Esquema y curvas características del carburador

### 3.2 Clasificación de los sistemas de inyección

La función del sistema de inyección consiste en aportar el combustible al colector de admisión o a la propia cámara de combustión, para que al unirse al aire, se forme la mezcla de aire-combustible. Esta aportación se lleva a cabo a través de los inyectores. Se pueden realizar diferentes clasificaciones para los sistemas de inyección, que se detallan a continuación:

- En función de su sistema de control:

-Inyección mecánica: En la que todo el proceso se lleva a cabo sin intervención de la electrónica, de forma mecánica y con el empleo de una bomba de alimentación de tipo eléctrica. El aspecto que más diferencia a estos sistemas de inyección de los del tipo electrónico, es el sistema de apertura de los inyectores, que se efectúa de forma totalmente mecánica, debido a la propia presión del combustible que se inyecta.

Estos sistemas, fabricados mayoritariamente por la firma Bosch, se denominan K-Jectronic aunque otras marcas han desarrollado sistemas similares. Se engloban dentro de los sistemas de aportación continua, dado que los inyectores están siempre abiertos mientras el motor está siempre en marcha. El aporte se lleva a cabo en el colector de admisión, catalogándose como un sistema de inyección indirecta. Dejaron de utilizarse a mediados de los años 80, debido a su poca implantación.

-Inyección electromecánica: Es una evolución del sistema anterior, fabricado también por Bosch y recibe el nombre de KE Jectronic. Partiendo de su estructura de funcionamiento, el control de la dosificación se lleva a cabo de forma electrónica, alterando la presión del combustible en sus circuitos internos, mediante un actuador electromagnético, sin embargo la apertura de sus inyectores se realiza de forma mecánica.

Es un sistema de aportación continua, como ocurre en el caso anterior, y por ello también un

sistema de inyección indirecta. En cuanto a su empleo en el mercado, fue similar al caso anterior, pero se prolongó unos años más.

-Inyección electrónica: Al igual que la inyección electromecánica, el control de la dosificación está a cargo de una centralita electrónica que actúa sobre los inyectores. Además, la apertura de los inyectores se efectúa con electroimanes integrados en los mismos, cuya alimentación eléctrica está a cargo de la centralita.

La aportación de combustible no es continua, se lleva a cabo en forma de intervalos. Actualmente los sistemas de inyección son de este tipo. Este tipo de sistema es usado tanto en inyección directa como en indirecta.

- En función del modo de aportación del combustible:

-Continua: Los inyectores están permanentemente abiertos, mientras el motor permanezca en marcha.

-Intermitente: Los inyectores se abren a intervalos regulares, siendo el tiempo que permanecen abiertos, el factor con el que se regula la dosificación.

- En función del número de inyectores:

-Monopunto: Se emplea un solo inyector para todos los cilindros. Es un sistema que se popularizó en los modelos más económicos, cuando la obligatoriedad de empleo de catalizador, hizo que todos los motores tuviesen que disponer de inyección electrónica. Su principal ventaja es su sencillez y economía de fabricación. En la actualidad apenas se continúa con la fabricación de estos sistemas debido a la popularización masiva de los sistemas multipunto.

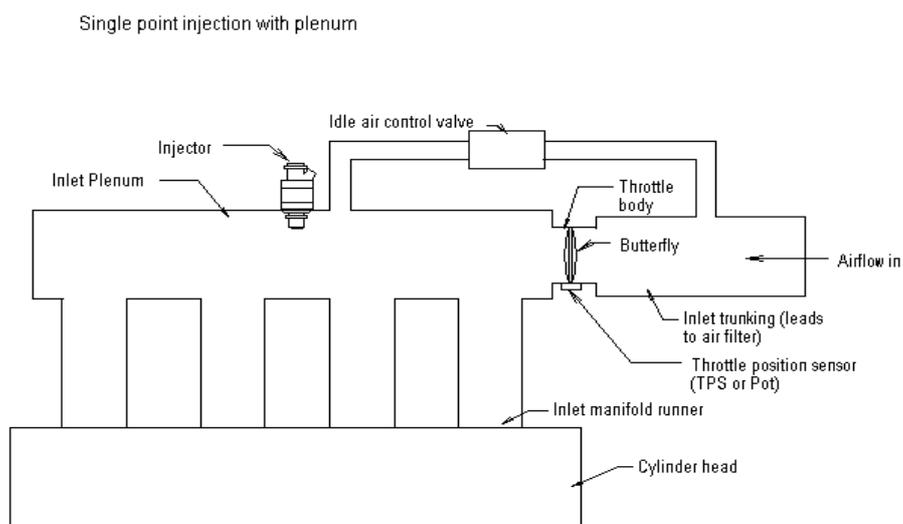


Ilustración 3-3: Esquema del sistema monopunto

-Multipunto: Se emplea un inyector por cada cilindro. Es el sistema que se emplea en la actualidad y pueden dividirse en:

-Simultáneos: Todos los inyectores se abren a la vez, una vez por cada vuelta de cigüeñal. Es el sistema empleado en las primeras inyecciones electrónicas llamado L-Jetronic. Es el sistema de inyección electrónica más sencillo. El rendimiento obtenido a bajo régimen es menor, ya que la válvula de admisión está abierta en un solo cilindro. Esto afecta negativamente a la vaporización y homogeneidad de la mezcla, por ello este sistema apenas es usado en los automóviles de la actualidad.

-Secuenciales: En estos sistemas, el aporte de combustible se lleva a cabo de forma individual, es decir, cada inyector se abre sólo cuando el cilindro está realizando la carrera de admisión. La homogeneidad y vaporización del combustible es mucho mejor a bajo régimen, por ello es el sistema más usado actualmente en la automoción.

Por otra parte, el suministro de combustible no sufre tantas alteraciones en su valor de presión, ya que los inyectores se abren de uno en uno.

El único inconveniente es la mayor complejidad del sistema, precisando de sensores que determinen en qué fase está cada cilindro, pero esto actualmente no supone gran problema.

-Semisecuenciales: Es una combinación de los dos anteriores, donde los cilindros que se agrupan por parejas son aquellos los cuales están realizando simultáneamente sus carreras( no sus tiempos), de tal forma que por ejemplo, se abren a la vez los inyectores de los cilindros 1 y 4, y posteriormente, cuando se ha efectuado un giro de 180º, lo hacen los cilindros 2 y 3.

La vaporización y homogeneidad en la mezcla está por encima de los sistemas simultáneos pero no de los secuenciales.

A modo de ilustración , se representan los procesos de cada uno de ellos en la figura:

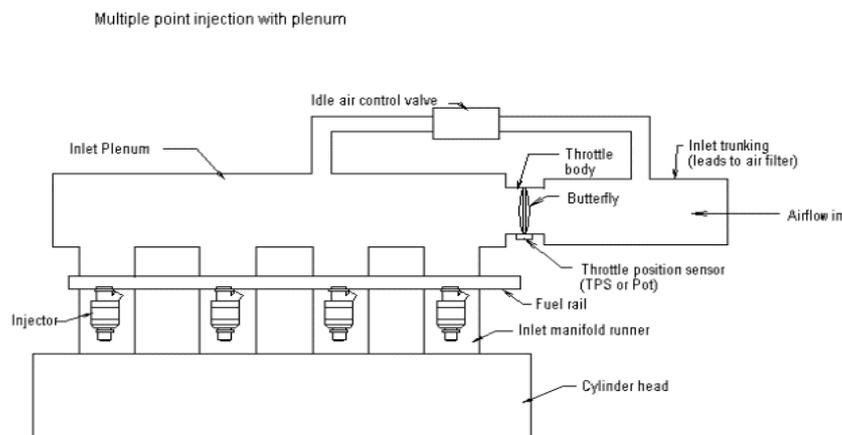


Ilustración 3-4:Esquema del sistema multipunto

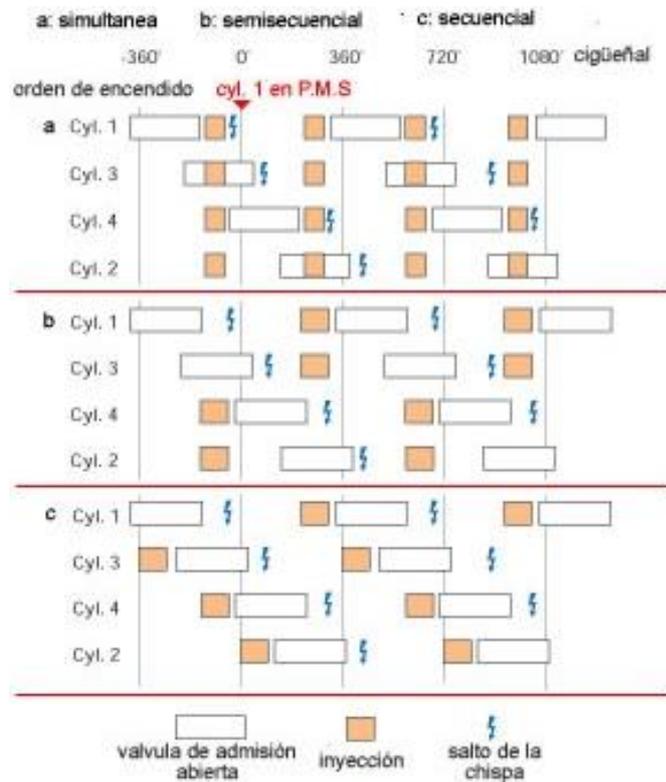


Ilustración 3-5: Procesos de inyección multipunto

- En función del punto de aportación del combustible:

-Inyección indirecta: El combustible se aporta en el colector de admisión, donde se mezcla con el aire. Este sistema fue el más usado para los motores gasolina desde finales de los años 80 hasta hace relativamente poco.

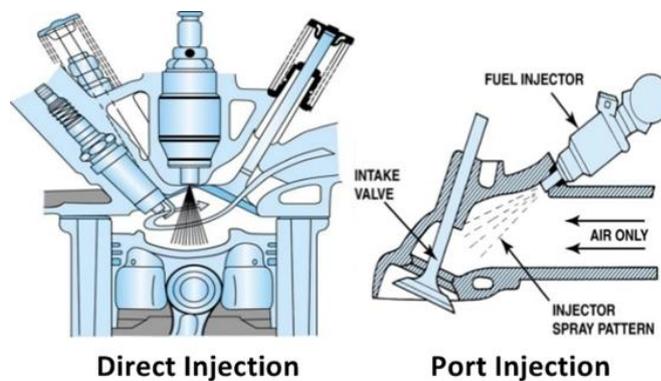


Ilustración 3-6: Inyección directa (izquierda), inyección indirecta (derecha)

-Inyección directa: El combustible se aporta directamente a la cámara de combustión, y es allí donde

se mezcla con la cantidad de aire correspondiente. Este sistema ha estado normalmente extendido en los motores diesel y actualmente está sufriendo un gran desarrollo para los motores gasolina.

# 4 LA INYECCIÓN DIRECTA EN MEC

El motor de combustión interna alternativo diesel, es el más ampliamente usado en la actualidad, en diferentes campos. Esto es debido a su alta eficiencia y su economía en el uso de combustible.

Las principales áreas de uso del motor diesel son:

- Instalaciones industriales.
- Vehículos ligeros.
- Vehículos pesados.
- Maquinaria para agricultura y construcción.
- Barcos y trenes.

## 4.1 Caracterización del MEC

Es un motor de encendido por compresión en el cual el aire y el combustible se mezcla en el interior de la cámara de combustión. El aire necesario para la combustión está altamente comprimido dentro de la cámara de combustión. Esto genera altas temperaturas, suficientes para la auto inflamación del diesel cuando este es inyectado en el cilindro. El motor diesel, por lo tanto, utiliza el calor para liberar la energía química contenida en el combustible y convertirla en energía mecánica.

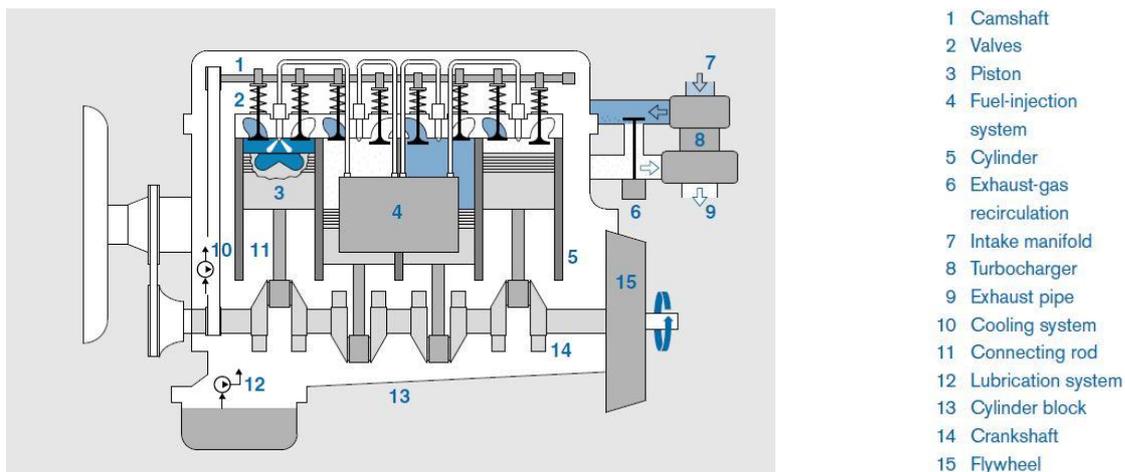


Ilustración 4-1:Esquema característico de un MEC

La eficiencia de estos motores ronda en torno a un 45-55%, y son ideales para la sobrealimentación mediante un turbocompresor.

El proceso de combustión en el motor diesel que influye fuertemente en factores tales como el rendimiento,

las emisiones de los gases de escape y el nivel de ruido, depende en gran medida de cómo se prepara la mezcla aire-combustible.

Los parámetros de la inyección más influyentes en la calidad de la mezcla formada son principalmente:

-Inicio de la inyección.

-Curva de inyección y duración de la inyección.

-Presión de inyección.

-Número de inyectores.

Además de la optimización en la cantidad de aire-combustible, la dosificación del combustible requiere tomar en cuenta límites de funcionamiento tales como: restricciones de humos, temperatura de escape límite, presión máxima de operación etc.

En los motores diesel, los gases de escape y el ruido de la combustión, se pueden reducir en gran parte con medidas dentro del motor, es decir, controlando el proceso de combustión.

El árbol de levas es el encargado de cerrar y abrir las válvulas. El reglaje de las válvulas consiste en la sincronización de la apertura y cierre de las válvulas con la rotación del cigüeñal. Por este motivo, el reglaje de la válvula se especifica en grados de rotación del cigüeñal. En el momento del paso de la fase de escape a la de admisión, ambas válvulas están simultáneamente abiertas durante cierto período, esto es conocido como "superposición de válvulas" y ayuda a limpiar el resto de gases de escape y enfriar el cilindro. La correcta sincronización en el funcionamiento de las válvulas es un proceso fundamental para el correcto funcionamiento del motor y para que este desarrolle una cierta eficiencia

Estos motores pueden ser de cuatro tiempos o dos tiempos, pero generalmente está más extendido el uso de los de cuatro tiempos.

## 4.2 Desarrollo de la inyección directa en MEC

El desarrollo de la inyección directa de diesel se ha debido principalmente al aumento en la presión de inyección del chorro de combustible en la cámara de combustión a lo largo de los años, con las nuevas tecnologías y técnicas de sincronización y control del motor.

Su sistema de inyección se divide en dos partes según las presiones de trabajo: baja presión (desde presión atmosférica hasta una presión del orden de 0,3MPa) y alta presión ( desde 10MPa hasta valores del orden de 250 MPa, dependiendo del punto de funcionamiento y del sistema considerado).

En este tipo de motores, la inyección de combustible se realiza directamente en la cámara de combustión del motor, por lo que se prescinde de la cámara dividida de la inyección indirecta. La cámara de combustión esta labrada en el mismo pistón, y no en la culata, como ocurre en la inyección indirecta. Al no existir pre-cámara de inyección, desaparecen las elevadas turbulencias que se generan en esta, que eran las encargadas de la dispersión del chorro de combustible. Por lo tanto, en la inyección directa, la calidad del chorro tiene un papel muy importante ya que no cuenta con la ayuda del medio para la producción de la mezcla aire-combustible.

Las soluciones adoptadas para ayudar a homogeneizar la mezcla aire-combustible en un motor de inyección directa son:

- Las diferentes formas que adopta el conducto de admisión y la cámara de combustión sobre el pistón, permiten que el aire de la admisión forme en ella un vórtice denominado swirl, que favorece la dispersión del diesel en la cámara de combustión.

- Al ser necesaria una buena cantidad del chorro, los inyectores son más complejos que los de inyección indirecta. Están equipados con toberas de varios orificios, cuyos diámetros son pequeños (entre 100 y 250 micrómetros). También son más robustos ya que las presiones de trabajo son mayores.

El menor consumo y el mayor rendimiento de la inyección directa han provocado el continuo incremento en la investigación con estos motores. Las consecuencias sobre el sistema de inyección son:

- Continua elevación de la presión de inyección. Algunos sistemas de inyección han sobrepasado ya los 200 MPa.
- Aumento del número de orificios de las toberas del inyector, así como la disminución del diámetro de los mismos, con el objeto de producir una atomización del chorro más homogénea.

Empleo de inyecciones múltiples. Así, por ejemplo, la utilización de inyecciones piloto, consistentes en inyectar durante la última parte de la carrera de compresión una pequeña cantidad de combustible que eleve la presión y la temperatura en la cámara de combustión, aceleran la posterior combustión principal y contribuyen a la reducción del ruido característicos en este tipo de motores.

### 4.3 Clasificación de los sistemas de inyección directa en MEC

Principalmente, se distinguen dos grupos: Sistemas de acción directa y sistemas de acumulación.

-Sistemas de acción directa: En estos sistemas, la bomba de alta presión es la encargada de dosificar el combustible requerido, a través de unos conductos (líneas de inyección) suministra a los inyectores que son los encargados de atomizar el combustible. La presión de suministro depende del régimen de giro de la bomba, y no es constante en la inyección. Sus principales inconvenientes son:

-El funcionamiento de la bomba no permite mantener una presión de inyección constante, cambiando, además, con el punto de funcionamiento del motor. Esto determina que la presión generada dependa del régimen de giro de la bomba.

-Como consecuencia de lo anterior, el inicio de la inyección también se ve modificado por las condiciones de funcionamiento del motor.

Este tipo de sistema fue muy usado en los primeros motores de inyección directa, pero ha sido reemplazado los últimos años por los sistemas common rail e inyector bomba.

-Sistemas de acumulación: Aquellos sistemas donde el inyector se encarga tanto de la dosificación del combustible como de su atomización. La única función de la bomba de alta presión es aumentar la presión del combustible y mantenerla constante una vez alcanzada la de consigna. La apertura del inyector en este caso es mayoritariamente electrónica, ya que desde los años 1995 en adelante, se han producido sistemas de mando electrónicos con suficiente fiabilidad. Este tipo de sistema se conoce actualmente como Common Rail.

Ventajas del Common Rail frente a sistemas tradicionales:

- Control del punto de inicio y duración de la inyección.
- Alta precisión.
- Presión inyección independiente del régimen del motor.
- Presión de inyección casi constante a lo largo de la inyección.

-Posibilidad de descomponer la inyección en dos o más etapas, con diversos fines como disminuir la combustión premezclada o controlar las emisiones de NOx y el ruido de la combustión entre otros.

Destacan también por sus elevadas presiones de inyección ( mayores de 200MPa).

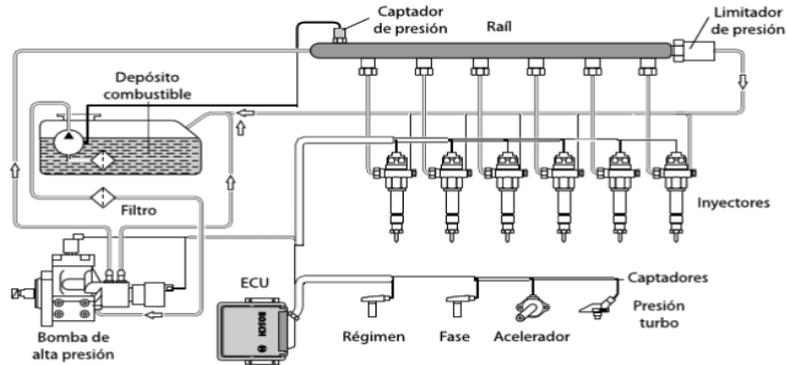


Ilustración 4-2:Esquema sistema Common Rail (Bosch)

Por último, el tercer tipo es el sistema inyector-bomba, que combina la bomba de inyección y la tobera de inyección en una única unidad que es accionada por el árbol de levas del motor, directamente o a través de seguidores y articulaciones. Cada inyector-bomba tiene su propia válvula solenoide, que controla el inicio y final de la inyección. La válvula solenoide es accionada por una ECU ( Unidad de Control Electrónico), por lo tanto la inyección es programable e independiente de la posición del pistón en el cilindro del motor.

Estos sistemas alcanzan presiones del orden de 160MPa, permiten controlar la inyección, en base a un mapa, que conduce a una reducción en las emisiones contaminantes.

Este sistema dispone de la posibilidad de desconectar individualmente los cilindros del motor, durante el funcionamiento a carga parcial.

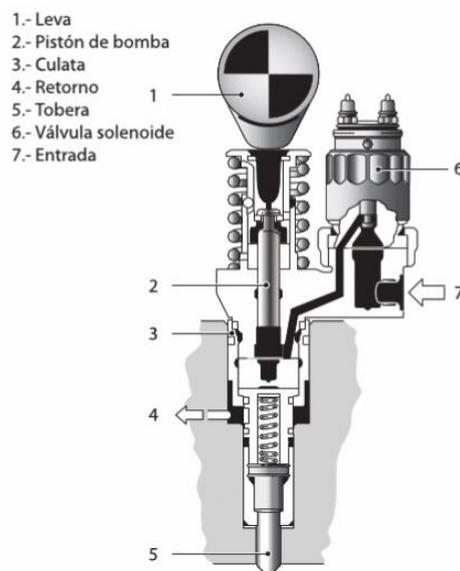


Ilustración 4-3Esquema sistema inyector-bomba (Bosch)

# 5 LA INYECCIÓN DIRECTA EN MEP

---

## 5.1 Resurgimiento e importancia en la actualidad

El retorno de la inyección directa de gasolina se produjo en el año 1996 con la aparición en el mercado japonés del Mitsubishi Galant/Legnum's 4G93 1.8L. Posteriormente, sería introducido en Europa mediante el nombre de Mitsubishi Carisma, a pesar de los problemas existentes con el alto contenido en azufre de la gasolina sin plomo usada, llevando a niveles de emisiones elevados y a eficiencias pobres en el ahorro de combustible. También desarrolló el primer motor de seis cilindros, el 6G74 3.5L V6, en 1997. Este tipo de tecnología fue usada ampliamente por Mitsubishi, produciendo más de un millón de motores GDI en cuatro familias diferentes en el año 2001.



Ilustración 5-1: Mitsubishi Galant GDI

PSA (Peugeot, Citroën), Hyundai y Volvo adquirieron la licencia de esta tecnología de Mitsubishi en 1999, con por ejemplo, el primer Hyundai GDI V8. El acrónimo GDI pertenece a Mitsubishi Motors a pesar de que otras empresas también desarrollaron motores de inyección directa sobre la época.

En 1998, Toyota introdujo en el mercado japonés en sistema de inyección directa D4 equipado en diversos vehículos con los motores SZ y NZ. Más tarde el sistema D4 se introdujo en Europa con el motor 1AZ-FSE equipado en el Toyota Avensis en 2001 y en Estados Unidos con el motor 3GR-FSE del Lexus GS 300 en 2005. Más adelante se desarrolló el motor D-4S que combinaba la inyección directa e indirecta con dos inyectores por cilindro. Apareció en el mercado estadounidense con el Lexus IS 350.2.

En 1999, Renault introdujo el sistema IDE 2.0 (Injection Direct Essence), primero en el modelo Megane y después en el Laguna. Este diseño, empleó altas tasas de recirculación de gases de escape (EGR) para mejorar el consumo a bajas cargas, junto con el empleo de inyección directa para concentrar el combustible alrededor de la bujía.

En el año 2000, el Grupo Volkswagen introdujo su motor gasolina de inyección directa en el Volkswagen Lupo 1.4l I4, bajo el nombre del sistema de "Fuel Stratified Injection" (FSI). Más adelante, este motor pero de 2.0l fue introducido en el Audi A4 del 2003.



Ilustración 5-2:Volkswagen Lupo 1.4 FSI

El Grupo PSA introdujo su primer motor GDi (HPi) en el año 2000 en el Citroën C5 y en el Peugeot 406. Era un motor de 2.0l y 16 válvulas con 140hp( 104kW) y usaba el sistema procedente de Mitsubishi.

En 2001, Ford introdujo su primer motor europeo con inyección directa llamado SCi (Smart Charge injection) para motores de encendido por chispa.

Un año más tarde Alfa Romeo introdujo la inyección directa en el mercado con el sistema JTS (Jet Thrust Stoichiometric) y hoy en día su mayoría de modelos siguen usando esta tecnología.

En 2003, BMW introdujo su primer motor de inyección directa de gasolina con el V12 N73. Hubo mejoras para este motor, pudiendo así desarrollar el sistema de quemado modo pobre. En el año 2007, se introdujo el nuevo motor de inyección directa con doble turbocompresor , el N54 para los modelos del 335i Coupe y para los modelos de la serie 535i y 135i.

A partir del año 2004 , General Motors introdujo en el mercado tres tipos de motores de inyección directa: en 2004 el motor Ecotec 2.2l de 155hp utilizado en los modelos Opel/Vauxhall Vectra y Signum.



Ilustración 5-3:Opel Vectra 2.2 Ecotec

En 2005 ; Mazda comenzó a usar su propia versión con el Mazda Speed 6 y más tarde con el CX-7 .

En 2006 Mercedes-Benz introduce el sistema (CGI) en el Mercedes CLS 350 con inyectores piezo-eléctricos.

La importancia en el profundo desarrollo de los motores de inyección directa en la actualidad viene dada por la continua fluctuación en los precios mundiales del petróleo y el agotamiento a medio plazo de esta fuente

de energía primaria que como consecuencia trae el desarrollo de motores que consuman menos; y la reducción de emisiones contaminantes, aspecto de gran importancia en la actualidad.

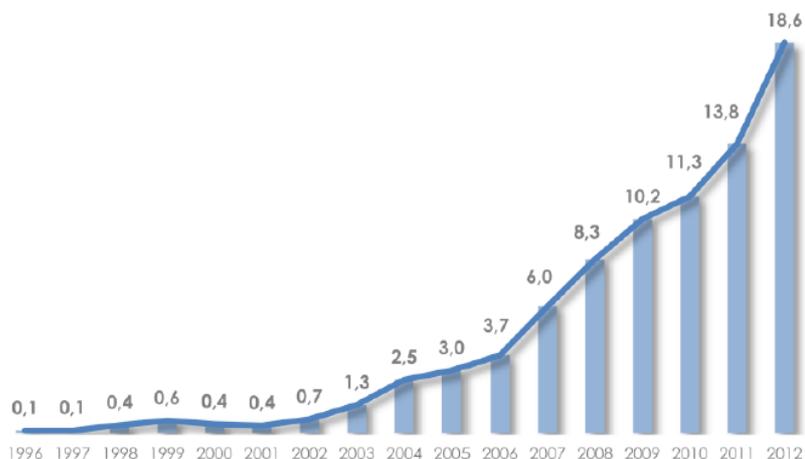


Ilustración 5-4: Evolución de vehículos de gasolina de inyección directa matriculados sobre el total de vehículos gasolina en España

La introducción de sistemas de inyección directa en motores de gasolina ha evolucionado a un ritmo muy lento desde su aparición en el mercado español a mediados de la década de 1990. Aunque aparentemente esta tecnología se encuentra aún en su etapa inicial de difusión, lo cierto es que en los últimos 4 años su presencia ha aumentado sustancialmente y los vehículos con inyección directa han duplicado su peso en el mercado hasta casi un 19% en 2012, lo que apunta una fuerte tendencia al alza hacia su previsible implantación masiva en la próxima década. De hecho, las estimaciones más recientes afirman que el 28% de los vehículos de gasolina que se matriculen en 2015 a nivel mundial serán de inyección directa.

Indudablemente, la inyección directa ha demostrado ser uno de los sistemas más eficaces desarrollados por la industria del automóvil para reducir el consumo de combustible en los vehículos propulsados por motores de gasolina, y consecuentemente las emisiones de gases a la atmósfera. Por tanto, no es de extrañar que esta tecnología acelere su introducción en el mercado en los últimos años, a medida que los planteamientos medioambientales y de eficiencia energética en nuestra sociedad se hacen cada vez más exigentes.

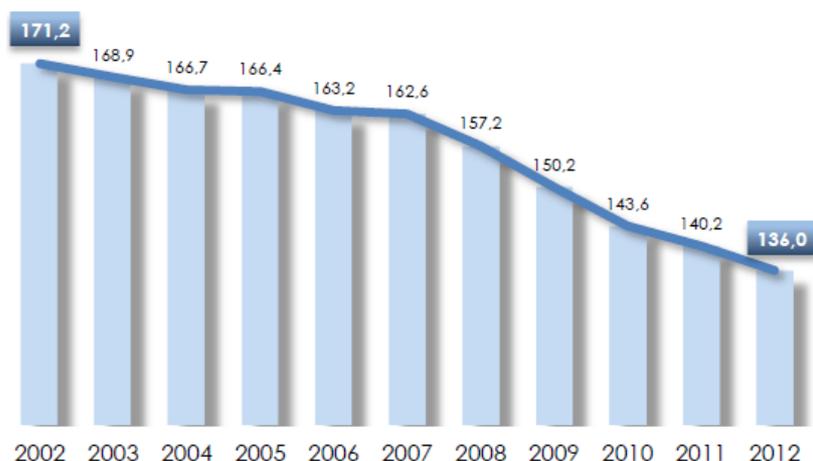


Ilustración 5-5: Emisión media de CO2 (g/km) en turismos de gasolina matriculados

La reducción más importante en las cifras de consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> se ha concentrado en los últimos 4 años (16,4% desde 2008), coincidiendo precisamente con la creciente introducción de vehículos de inyección directa en nuestro mercado. El consumo medio de litros de gasolina ha pasado de ser de 7,2 l/km en el año 2002 a 5,7 l/km en el año 2012.

La tecnología de inyección directa de gasolina es la base para las futuras generaciones de motores basados en accionamientos más limpios y de bajo consumo. La inyección directa consigue una reducción en el consumo de hasta un 15%, un aumento del par motor de hasta un 5% y una respuesta instantánea.

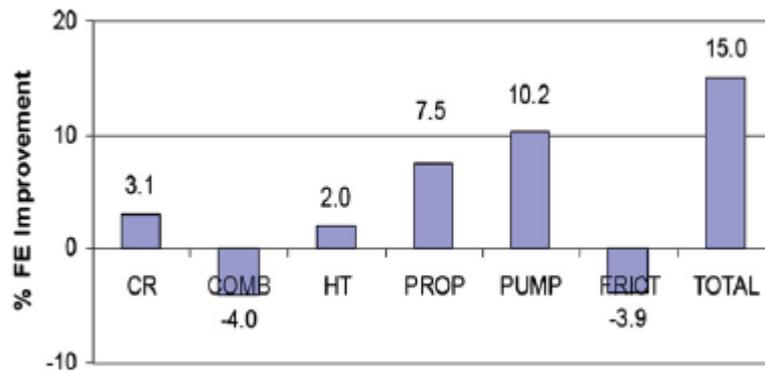


Ilustración 5-6: Factores que afectan al ahorro de combustible de un motor GDI frente a un PFI

La gráfica anterior muestra las contribuciones de varios factores, que afectan al ahorro de combustible en un motor de inyección directa de gasolina. Las contribuciones positivas respecto al ahorro de combustible del motor son: la relación de compresión (CR), la transferencia de calor (HT), las propiedades de la mezcla (PROP) y el bombeo (PUMP); mientras que las contribuciones negativas que más afectan son: la combustión (COMB) y la fricción (FRICT). El mayor contribuyente positivo al ahorro de combustible en este tipo de motor es la reducción de las pérdidas por bombeo debido a la reducción de la regulación, que representa aproximadamente un 10% en el ahorro de combustible, seguido por las propiedades de la mezcla (7.5%), la relación de compresión (3.1%) y la transferencia de calor (2%). Por otro lado, la combustión y la fricción aportan una pérdida del 4% y 3.9% en el ahorro de combustible.

Además la inyección directa de gasolina, en combinación con la sobrealimentación del motor, permite implantar conceptos de "downsizing" para los motores de combustión, que logran una reducción adicional del consumo, potencialmente hasta un 30%, sin renunciar a prestaciones mecánicas como el par de giro o potencia de los motores.

## 5.2 Caracterización del MEP de inyección directa

En los motores de inyección directa de gasolina, la mezcla de aire y combustible se forma directamente en la cámara de combustión.

El circuito de alta presión del sistema de inyección directa de gasolina está alimentado por una bomba de alta presión que comprime el combustible desde una presión inicial de 0,3-0,5 MPa hasta llegar a la presión de inyección necesaria en el raíl, entre 7 y 15 MPa.

Los inyectores conectados al raíl de combustible dosifican y atomizan el combustible de forma extremadamente rápida y a alta presión para permitir la mejor preparación de la mezcla directamente en la cámara de combustión. De este modo, el combustible y el aire se mezclan en una zona específica de la

cámara, a fin de lograr una combustión óptima de la gasolina. Hasta siete orificios individuales de inyección permiten una adaptación flexible de la inyección a la cámara de combustión correspondiente.

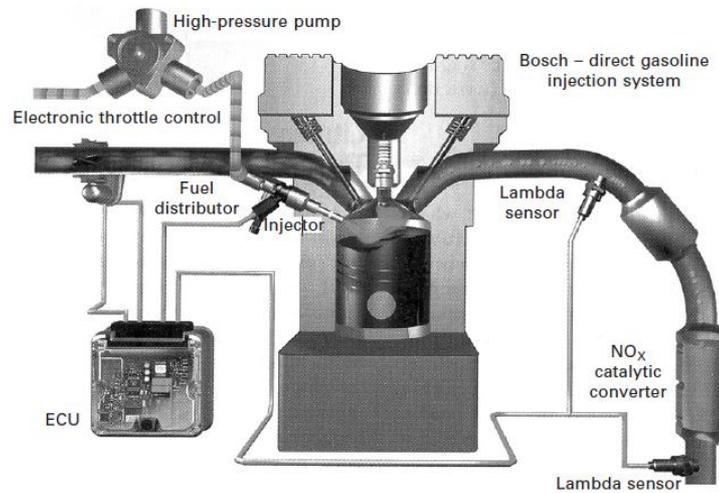


Ilustración 5-7: Esquema típico motor gasolina inyección directa (Bosch)

Gracias a la formación homogénea de la mezcla, su dosificación precisa para cada ciclo de combustión y la válvula de inyección de alta presión, se consigue optimizar el quemado de la gasolina (minimizando la presencia de hidrocarburos no quemados) y reducir considerablemente el consumo, y por tanto la emisión de gases de escape.

Esta tecnología se puede utilizar en todos los motores de gasolina gracias al bajo peso y reducido tamaño de los inyectores de alta presión, a su amplia variedad de formas de atomizado de gotas y a la distribución homogénea de la mezcla. Todas estas propiedades ejercen una influencia favorable en el proceso de combustión y permiten, además, mejorar el arranque en frío y las reacciones a los cambios de carga.

### 5.3 Relación aire-combustible y su influencia

La proporción ideal de aire y combustible en un motor de gasolina es de 14,7 kg de aire por 1 kg de combustible. Esta relación ideal es la conocida mezcla estequiométrica. La cantidad de aire introducida en la combustión se corresponde exactamente con la necesidad teórica de aire. Con esta proporción está garantizada la combustión completa y el catalizador puede convertir prácticamente la totalidad de los gases de escape nocivos en gases inocuos para el medio ambiente. El exceso de aire se define como:

$$\lambda = \frac{\text{masa de aire introducida}}{\text{masa teórica de aire requerida}}$$

El valor del exceso de aire ( $\lambda$ ) para una mezcla estequiométrica es de 1.

En la actualidad gran parte de los MEP funcionan con esta mezcla. Con otros tipos de combustible y diferentes sistemas actuales, la relación aire-combustible es diferente.

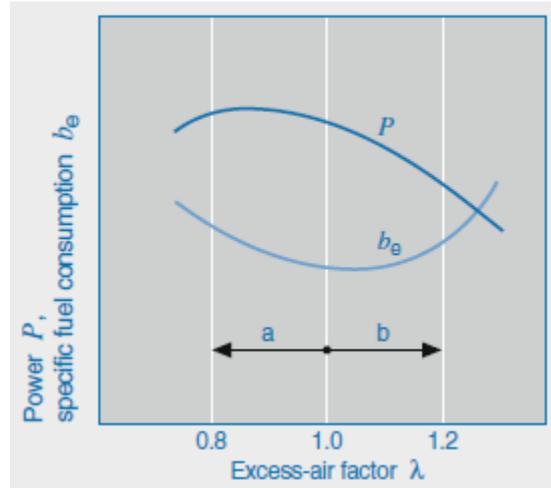


Ilustración 5-8: Influencia de  $\lambda$  en la potencia y consumo del motor

En un MEP convencional, mezclas ricas de combustible resultan en  $\lambda < 1$ , como se puede apreciar, la dirección de la flecha "a", a mayor cantidad de combustible, mayor consumo específico. En ciertos intervalos, esto mejorará la potencia de salida, pero aumentará también el desgaste del motor y las emisiones contaminantes. Por otro lado, mezclas pobres de combustible resultan en  $\lambda > 1$ , donde existe exceso de aire, y hasta cierto rango habrá una mejora en el consumo específico y en la disminución de las emisiones contaminantes. Parte de las estrategias actuales en los motores de inyección directa de gasolina, trabajan con  $\lambda > 1$ .

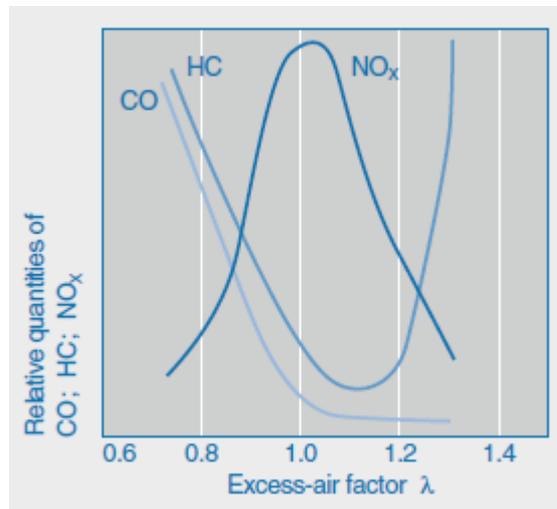


Ilustración 5-9: Influencia de  $\lambda$  en emisiones contaminantes

El mayor o menor grado de exceso de aire, da lugar a una mayor cantidad de emisiones de un tipo u otro de agente contaminante. Por ello, se requiere del apoyo de sistemas de tratamiento de gases de escape, para poder así reducir en mayor medida las emisiones contaminantes.

Parte de la estrategia actual de la inyección directa de gasolina, trabaja con valores de  $\lambda > 1$  gracias a la sobrealimentación, el EGR e inyecciones en modo pobre de combustible entre otros sistemas. Esto provoca altas emisiones en HC y partículas, y de ahí la importancia del uso de sistemas pos tratamiento junto con la inyección directa.

## 5.4 Procesos de combustión

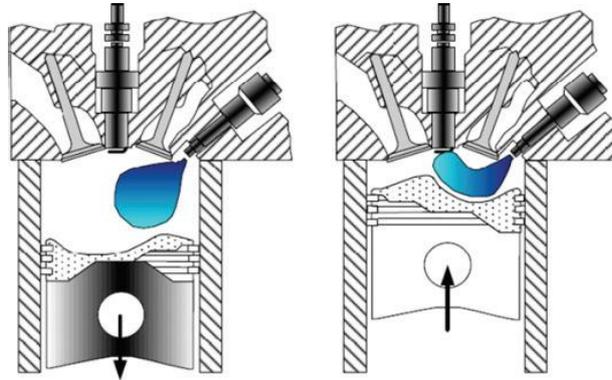


Ilustración 5-10: Procesos de combustión homogéneo y estratificado

En los motores de inyección directa de gasolina, el proceso de combustión tendrá lugar en el interior de la cámara de combustión. Los mecanismos de combustión están determinados por la geometría de la cámara de combustión, el colector de admisión, el punto de inyección y el proceso de encendido.

Es de gran importancia la relación entre la cantidad de aire y de combustible inyectado para los diferentes procesos en la combustión. El flujo de aire entrante es el encargado de transportar el combustible hacia un área determinada de la cámara de combustión para su evaporación en una zona concreta.

El proceso de combustión en la inyección directa de gasolina se compone de varios modos de funcionamiento diferentes, entre los cuales el proceso cambia en función del punto de funcionamiento del motor. Básicamente, los procesos de combustión se dividen en dos categorías: carga estratificada o carga homogénea.

- Proceso de combustión homogénea: En este caso, el proceso de combustión se realiza normalmente con una mezcla estequiométrica con un valor de  $\lambda=1$  y con la inyección del combustible al comienzo de la carrera de admisión. De esta manera se puede evitar el costoso tratamiento de gases de escape en emisiones de NOx. Este proceso de combustión puede tener diferentes modos especiales de operación según los requerimientos específicos del motor en su aplicación.
- Proceso de combustión con carga estratificada: En este caso, la inyección del combustible se produce en un rango específico dentro del mapa de operación del motor (como por ejemplo a bajas cargas o a bajas revoluciones del motor) durante la carrera de compresión del motor. De esta manera se produce una nube de mezcla aire-combustible cerca de la bujía de encendido. La relación aire-combustible  $\lambda$  en este caso será mucho mayor que 1. Esto permitirá operar al motor en un rango mayor de posiciones sin la estrangulación de la mariposa, traduciéndose en una mayor eficiencia debido a la reducción por las pérdidas por bombeo.

## 5.5 Modos de operación

A continuación, se describirán los principales procesos usado en un motor de inyección directa de gasolina. El modo de operación apropiado dependerá de las necesidades y requerimientos del motor en un punto

concreto de funcionamiento:

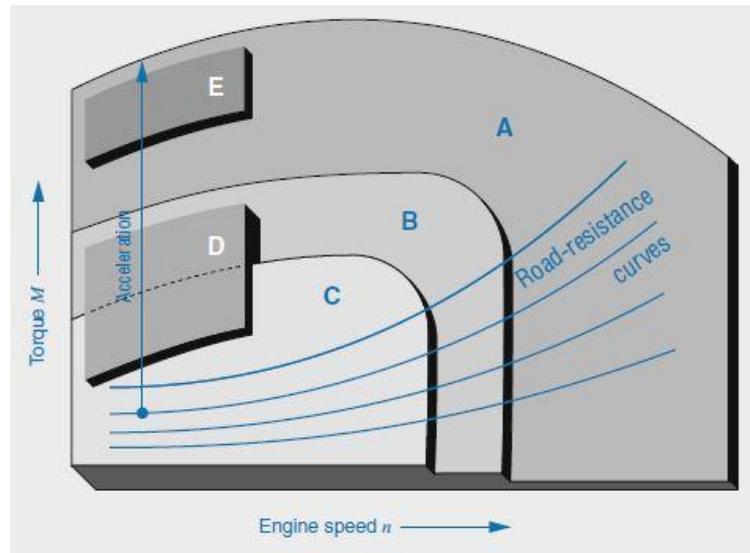


Ilustración 5-11: Modos de operación en el mapa de motor

- Homogéneo: Zona A. En este caso, la relación aire-combustible es estequiométrica con valor de 14.7:1. El combustible se inyecta durante la fase de admisión para que haya tiempo suficiente de homogeneizar toda la mezcla. También funciona con un ligero exceso de combustible  $\lambda < 1$  con el propósito de proteger el catalizador o aumentar la potencia a plena carga. En este modo de operación las emisiones contaminantes pueden ser tratadas fácilmente por un catalizador de tres vías.
- Carga estratificada: Zona C. En este modo de operación el combustible es inyectado durante la carrera de compresión. Con esto se consigue que se cree una nube de combustible rodeado de gran cantidad de aire cerca de la bujía de encendido. Este tipo de operación requiere un tratamiento de gases de escape más caro, ya que el catalizador de tres vías es incapaz de reducir las emisiones de NOx. Este modo solo se puede ejecutar dentro de ciertos límites porque a altas cargas se produce un alto número de emisiones de hollín y NOx. La velocidad está limitada en torno a 3000 rpm debido a que a velocidades superiores no se dispone del tiempo suficiente para homogeneizar parte de la nube de carga estratificada.
- Homogéneo-pobre. Zona B: Entre los tradicionales rangos de carga estratificada u homogénea, el motor puede funcionar con una mezcla de aire-combustible pobre ( $\lambda > 1$ ). El consumo de combustible es inferior en este modo comparado con el homogéneo. Sin embargo, este modo está acompañado de un incremento en las emisiones de NOx y será necesario un sistema de pos tratamiento más sofisticado.
- Carga estratificada-homogénea: Zona D. En este modo, se realiza una primera inyección pobre de combustible durante la carrera de admisión que llena toda la cámara de combustión seguida de una segunda inyección durante la carrera de compresión. Esto provoca una mezcla más rica en las zonas adyacentes a la bujía. Este modo se activa durante un número de ciclos durante la transición entre el modo homogéneo y estratificado y de esta manera ajustar mejor el par. El 75% del combustible es

inyectado durante la primera fase. Este modo de transición reduce las emisiones de hollín comparado con el modo de carga estratificada y el consumo comparado con el modo homogéneo.

- Homogéneo dividido: Este modo es una aplicación especial del anterior. Se utiliza después del arranque para poner el catalizador hasta la temperatura de funcionamiento.
- Homogéneo de protección ante el autoencendido: Zona E. Para prevenir la aparición del autoencendido de la mezcla a altas cargas se pueden aprovechar características del modo de carga estratificada en modo homogéneo, como el uso del retraso de encendido y la doble inyección. En realidad el potencial de este modo de funcionamiento es bastante limitado.
- Carga estratificada para el calentamiento del catalizador: Zona C. Modo estratificado con un alto nivel de exceso de aire, donde la inyección se realiza también en la carrera de compresión y luego nuevamente en la carrera de potencia. De esta manera, este combustible se quema muy tarde y provoca el calentamiento drástico del colector de escape a su vez conectado al catalizador.
- Carga estratificada en el arranque: Zona C. La ventaja de este modo de inyección se basa en que el combustible se inyecta en el aire ya comprimido y calentado. De esta manera se evapora más combustible en condiciones iniciales más frías. Con este modo se reduce la cantidad de combustible inyectada y las emisiones de HC durante el arranque. Ya que durante el arranque el catalizador no funciona, este modo es importante para el desarrollo de conceptos de baja emisión.

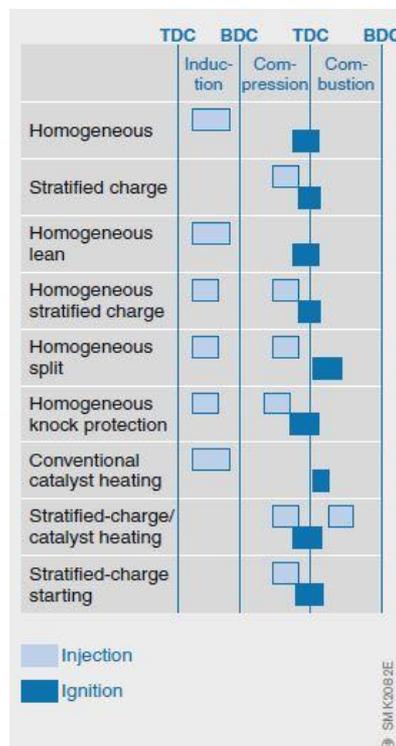


Ilustración 5-12: Inyección y combustión en los diferentes modos de operación

## 5.6 Sistemas de combustión

Tanto la posición de la bujía en la cámara de combustión, como la distribución y geometría en esta y en el pistón, son factores determinantes a la hora de elaborar una mezcla aire-combustible de calidad y de forma rápida. Por ello, existen diferentes distribuciones en el interior de la cámara de combustión para facilitar el mezclado del aire con el combustible, la rápida ignición de la mezcla y propagación del frente de llama, factores fundamentales para el funcionamiento eficiente del motor.

### 5.6.1 Sistemas de combustión de primera generación

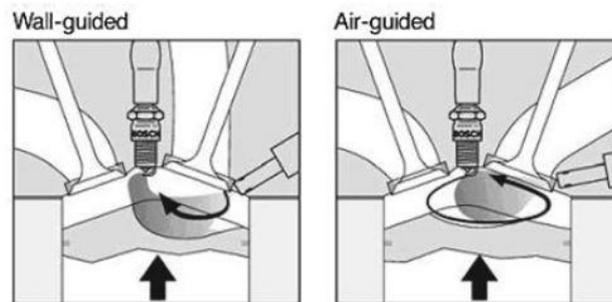


Ilustración 5-13: Sistemas de guiado de primera generación

Los dos sistemas de combustión que se agrupan bajo esta denominación son los de guiado por pared y guiado por aire. Se denominan de primera generación porque eran los que se utilizaron en los primeros motores de inyección directa de finales del siglo XX, hasta que se vio que sus ventajas se veían neutralizadas por algunos inconvenientes que presentaban y que se detallarán más adelante; por ello se pasó al uso de la inyección indirecta con carga homogénea hasta la aparición de los sistemas de combustión de segunda generación (o de guiado por pared).

Tanto en los sistemas de guiado por pared como los de guiado por aire, el inyector se sitúa normalmente entre las válvulas de admisión, inyectando la gasolina con una presión de entre 50 y 160 bar.

En los sistemas de combustión de guiado por aire, que son la mayoría de los sistemas de combustión de primera generación, la mezcla se prepara y dirige hacia la bujía mediante un hueco especialmente diseñado a tal efecto que se encuentra en la cabeza del pistón, como puede verse en el esquema.

Algunos problemas que se derivan de las características propias de este sistema de combustión son:

- Debido a que el inyector está dirigido hacia la cabeza del pistón, se producen acumulaciones de combustible y aumentan las emisiones de hidrocarburos inquemados.
- Los colectores de admisión necesarios para producir el flujo de aire adecuado dentro del cilindro durante el funcionamiento en carga estratificada tienen efectos adversos en el funcionamiento a altas cargas.
- El desplazamiento de la mezcla es dependiente de la posición del pistón, lo que hace muy difícil coordinar los tiempos de inyección y encendido para todo el rango de operación del motor.
- Debido al especial diseño del pistón, éste es mayor y más pesado, lo que se traduce en mayores pérdidas mecánicas.

Para solucionar los problemas de emisiones de hidrocarburos inquemados se recurre a los sistemas de combustión de guiado por aire, en los cuales se diseña el colector de admisión y la cabeza del pistón para que sea el flujo de aire el que dirija la nube de mezcla hacia la bujía para hacer posible la combustión, como puede verse en el esquema de la Figura anterior. A pesar de que reduce las emisiones de hidrocarburos inquemados respecto al guiado por pared, no los elimina, y mantiene los otros problemas de éste, por lo que ambos se engloban en la misma generación.

### 5.6.2 Sistemas de combustión de segunda generación

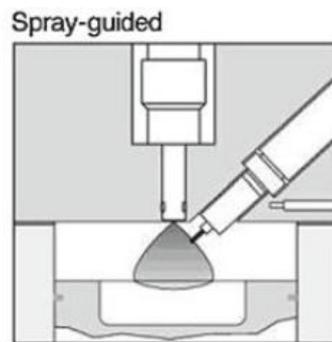


Ilustración 5-14: Esquema del sistema de guiado por chorro

Los sistemas de combustión de segunda generación, o de guiado por chorro, enfocan el problema de llevar la nube de mezcla a las proximidades de la bujía de una manera distinta a la de los sistemas de combustión de primera generación. En éstos el inyector se sitúa en el centro de la parte superior de la cámara de combustión, donde tradicionalmente se situaba la bujía, y ésta se desplaza ligeramente hacia un lado, situándose muy próxima al inyector, como puede verse en la Figura, para asegurar la formación de la nube de mezcla inflamable en los alrededores de la bujía. La gran ventaja de esta solución es la disposición de la mezcla en las inmediaciones de la bujía recorriendo menos espacio; la desventaja asociada a esto es el poco tiempo disponible para la preparación de la mezcla, lo que lleva a que se usen inyectores capaces de inyectar hasta a 200 bar. Con esta configuración se solucionan los principales problemas de los sistemas de combustión de primera generación:

- Debido a que el chorro de gasolina o la mezcla no entran en contacto con la cabeza del pistón o las paredes del cilindro, sino que queda “en suspensión” alrededor de la bujía, se evitan los problemas de acumulación de combustible y se disminuyen las emisiones de hidrocarburos inquemados.
- El flujo de aire ya no es necesario para dirigir la mezcla a la bujía cuando el motor trabaja en carga estratificada por lo que el colector de admisión puede diseñarse para maximizar su efectividad a altas cargas.
- El desplazamiento de la mezcla es independiente de la posición del pistón, lo que simplifica la coordinación de los tiempos de inyección y encendido.
- No es necesario modificar el pistón para dirigir los flujos de aire, por lo que no se aumentan las masas móviles y por tanto no aumentan las pérdidas mecánicas.

## 5.7 Ventajas e inconvenientes inyección directa frente a indirecta

Nos encontramos en una época de transición entre la inyección indirecta y la directa en la que para aprovechar las ventajas de la inyección directa aún hay que enfrentarse a algunos obstáculos que hacen que aún la inyección indirecta siga existiendo de manera consistente en el mercado automovilístico aunque actualmente casi todos los fabricantes de automóviles se decanten por la tecnología de inyección directa. A continuación, se comentarán primero las ventajas de la inyección directa respecto a la indirecta, para después recalcar los inconvenientes de esta y hacer una valoración global de la utilidad de la inyección directa en la actualidad.

-Ventajas:

- Mayor ahorro de combustible. El funcionamiento a carga estratificada puede llegar a alcanzar una relación aire-combustible muy alta, por lo que el aporte de gasolina a bajas carga es únicamente el necesario para permitir la producción exacta de energía requerida por el motor. Esta disminución en el consumo se traduce en menores emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Menores pérdidas por bombeo. Debido a la regulación por carga estratificada, el comportamiento del motor gasolina podría aproximarse al del motor diesel, es decir, la regulación de la mezcla pasaría de la cuantitativa de los motores de inyección indirecta a cualitativa. Esto provocaría la desaparición de la válvula de la mariposa situada en el colector de admisión y con ello menores pérdidas por bombeo.
- Efecto refrigerante de la gasolina al producirse su evaporación en el interior de la cámara de combustión, donde esta absorbe una parte del calor contenido en el aire, reduciendo la temperatura de la mezcla. Esto permite unos valores mayores de relación de compresión que mejoran el rendimiento y la potencia del motor además de disminuir el riesgo del autoencendido.
- Control más preciso de la relación aire-combustible.
- Reducción del problema de arranque en frío y de los regímenes transitorios de aceleración. En la inyección indirecta, la inyección de la gasolina en el colector de admisión produce el llamado mojado de pared, donde parte de la gasolina inyectada se condensa en las paredes del motor provocando la necesidad de inyectar una mayor cantidad de gasolina, que supera el valor estequiométrico y esto se traduce en un aumento de las emisiones de los hidrocarburos no quemados. Este problema se evita con la inyección directa.
- Aumento de la eficiencia volumétrica.
- Prevención ante el autoencendido de la mezcla. Esto se puede evitar con el motor trabajando a cargas estratificadas, puesto que la mezcla más alejada de la bujía, que es donde se suele producir el autoencendido, es muy pobre y por tanto no tiene la capacidad potencial de auto inflamarse. La mayor tendencia al autoencendido se produce a cargas estequiométricas.

- Aumento de la presión media efectiva (aumento de la eficiencia) entorno a un 6%. Esto es debido a que durante el período de admisión solo entra aire al cilindro, y posteriormente la gasolina, por lo que la cantidad de aire que entra en el cilindro no se verá reducida por la cantidad de gasolina que entra, como ocurre en el proceso de premezcla en el colector de admisión de la inyección indirecta.

-Inconvenientes:

- Dificultad en el control de la combustión durante el rango operativo del modo de carga estratificada. Esto es debido a que la inyección de gasolina se produce al final de la carrera de compresión, quedando así un tiempo muy limitado para la evaporación y mezcla de la gasolina. Por ello, a velocidades altas del motor  $n > 3000$  rpm no es posible el funcionamiento del motor en modo de carga estratificada.
- Ligero aumento en las emisiones de hidrocarburos inquemados.
- Alta tasa de emisiones de NOx. Este es uno de los principales problemas de los motores de inyección directa de gasolina y se produce especialmente a cargas altas y en las zonas de transición entre dosado rico y pobre en mezcla estratificada.
- Inutilidad del catalizador de tres vías en ciertos modos de funcionamiento del motor. Este punto está relacionado con el anterior, debido al alto contenido de oxígeno en los gases de escape, no hay suficiente CO y HC disponibles para reducir las emisiones de NOx. Como consecuencia, se incrementará el coste del motor debido a la necesidad de otros sistemas de reducción de NOx. Se utilizará el conocido EGR (recirculación de los gases de escape, que será desarrollado más adelante en profundidad), que permite una reducción en la temperatura de combustión en el interior del motor además de implementar un nuevo catalizador aguas abajo del catalizador de tres vías, conocido como acumulador de NOx.
- Problemática en el funcionamiento del acumulador de NOx. Esto es debido a que cuando se encuentra lleno, necesita de una mezcla rica para regenerarse, provocando que la eficiencia conseguida por la inyección directa se vea reducida. Además, con el uso de gasolinas corrientes, provoca un incremento en la realización de este proceso de regeneración, disminuyendo aún más la eficiencia del sistema.
- Incremento en las emisiones de partículas. Este problema es parecido al de los motores diesel, donde se expulsan gran cantidad de partículas de pequeño tamaño perjudiciales para el medio ambiente en general. La solución a este problema conlleva un incremento en los costes del motor, provocando la necesidad de incluir en el sistema de escape unos filtros antipartículas (FAP).
- Alta tasa de formación de depósitos en los inyectores y acumulación de restos de hollín en las válvulas de admisión.
- Aumento de costes debido a los elementos que tienen que añadirse al sistema de inyección directa. Destacan el labrado de la cabeza del pistón para que pueda guiar la nube de mezcla de gasolina hacia la bujía.

- Mayor desgaste de los componentes del sistema debido a las altas presiones y baja capacidad de lubricación del combustible.
- Complejidad en las tecnologías de inyección y de control para un perfecto transitorio entre diferentes tipos de carga. Necesidad de una ECU de mayor potencia de cálculo.
- Aumento en el desgaste del diámetro interior del cilindro.
- Mayores requisitos de funcionamiento en los inyectores y controladores.
- Aumento en el nivel de presión en el sistema de combustible traducido a mayores pérdidas parásitas durante el bombeo de combustible.

# 6 TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS MOTORES DE LA ACTUALIDAD

---

Durante muchos años, las dos principales estrategias seguidas en los motores de combustión han sido el motor de encendido provocado ( Spark Ignition) y el motor de encendido por compresión(Compression Ignition) referidos a el uso de gasolina y de diesel respectivamente.

El encendido por chispa está caracterizado por la aparición de un frente de llama cuya mezcla es homogénea y por el uso de combustibles de alto octanaje( gasolina, gas natural...) mientras que el encendido por compresión requiere un combustible con tendencia al autoencendido ( gasóleos, esteres...) ya que se basan en una llama de combustión no homogénea.

Para los sistemas de encendido por chispa, la principal solución para las emisiones de HC, CO y NOx han sido durante décadas el control de la relación aire combustible de forma exhaustiva y el uso del catalizador de tres vías. También , durante las últimas décadas, el esfuerzo de mejora se ha centrado en la dosificación de la aportación del combustible. Sin embargo , la principal desventaja en la combustión por chispa siempre ha estado relacionada con el riesgo de la auto detonación del combustible, conocido como "knock", que es el principal limitador de la relación de compresión en el cilindro y en el desarrollo futuro del encendido provocado. También destaca la necesidad de regular la cantidad de flujo de entrada aportado al motor, como medida de regulación de la carga del motor. Estos dos aspectos tienen un gran impacto en la eficiencia del motor de gasolina, que sigue siendo bastante inferior a la del motor diesel.

Por el contrario, para los clásicos sistemas de encendido por compresión, su combustión permite desarrollar una eficiencia mayor en las operaciones del motor, pero sufren de una mayor producción de NOx y partículas debido a las altas relaciones de compresión locales en la cámara de combustión y a la temperatura de la llama. Además el ruido también es un problema a destacar debido a la rápidas operaciones de combustión. Por tanto, el uso de la recirculación de gases de escape (EGR) ,permite disminuir en pequeña medida esta formación de contaminantes, pero con sus coste adicional y con una penalización en la eficiencia del motor.

Actualmente, no solo existen estos dos conceptos en la combustión del motor, existe un amplio abanico de nuevos conceptos de combustión, algunos de ellos ya implantados, otros en pleno desarrollo y mejora, todos ellos con diferentes perspectivas de implantación en su futuro. Por lo tanto, los conceptos de motores diesel y gasolina en la actualidad, van mucho más allá de los clásicos "Spark Ignition" o "Compression Ignition" y de los conceptos asociados únicamente a mezcla homogénea o no homogénea , estequiométrica o no estequiométrica.

A partir de aquí, el objetivo principal es desarrollar las diferentes nuevas estrategias seguidas en la última década por los motores gasolina y diesel. Este desarrollo incluirá la descripción de los diferentes sistemas, sus modos de funcionamiento, las ventajas e inconvenientes que conllevan, y su relación con el mercado automovilístico en la actualidad. Como breve introducción, destaca la aparición de los llamados " Lean Burn Direct Injection", "Stratified Direct Injection", "Controlled Auto-Ignition Injection" u "Homogeneous Charge Compression Ignition" .

## 6.1 Inyección directa con mezcla pobre (LBDI)

También conocida por sus siglas en inglés como LBDI (Lean Burn Direct Injection), este sistema es uno de los principales modos de actuación de la inyección directa en nuestros días, con operaciones en modo pobre y un aumento de la presión en la carga dentro del cilindro. Gracias a esta combinación de estrategias, el motor también podrá disminuir su tamaño (Downsizing), con todas las ventajas que esto conlleva.

### 6.1.1 Principio de funcionamiento

Este método de combustión permite lograr el máximo potencial de combustión termodinámica a cargas bajas. Hasta ahora, esta tecnología está limitada a los mercados europeo y japonés, debido a la amplia disponibilidad de combustibles bajos en azufre, aunque en un futuro esta tecnología se extenderá a otros mercados como el de los Estados Unidos.

Cabe destacar que uno de los factores más importantes en la sobrealimentación del motor, es el octanaje contenido en la gasolina. Normalmente, a fin de evitar la autodetonación, la relación de compresión geométrica se reduce. Sin embargo, con la combinación de la inyección directa y una operación en modo homogéneo pobre, se ayuda a evitar el requerimiento de la reducción del octano en la gasolina permitiendo así utilizar relaciones de compresión geométrica mayores. A continuación, se presenta el esquema que describirá el funcionamiento del sistema de combustión en modo pobre:

En primer lugar, se puede observar que el rango de funcionamiento de la relación aire/combustible cambia debido a que la admisión de la carga se encuentra sobrealimentada.

En el límite de admisión en el modo de funcionamiento más rico posible, la estabilidad de la combustión es mayor cuanto mayor es el parámetro de exceso de aire ( $\lambda$ ).

Por otro lado, en el límite de funcionamiento inferior, el modo pobre, la estabilidad de la combustión está limitada por la iniciación de la chispa en el motor y la propagación del frente de llama. El límite de funcionamiento en modo pobre aumenta con el incremento de la sobrealimentación, por lo tanto el mapa de funcionamiento global se desplaza hacia valores mayores de  $\lambda$ .

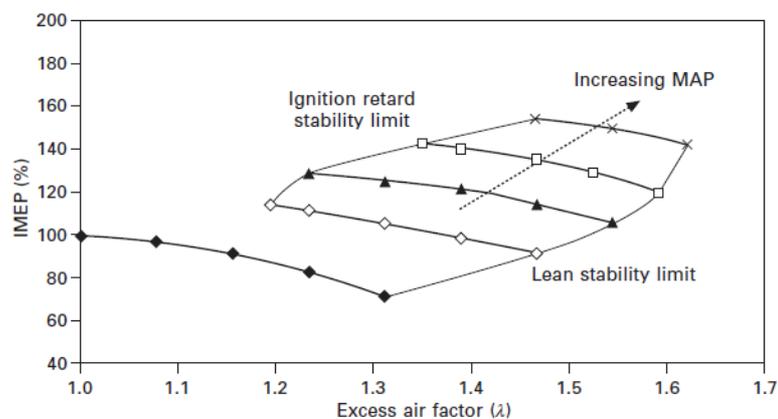


Ilustración 6-1: Mapa de funcionamiento de LBDI

Como la relación aire-combustible aumenta desde el límite rico hasta el pobre, la potencia de salida disminuye. Por lo tanto, el principal objetivo en este tipo de combustión es sobrealimentar a un nivel en el

que la presión media efectiva indicada (IMEP) sea superior a la del valor estequiométrico de aspiración atmosférica, para así poder aplicarse también el conocido downsizing, pero con una mezcla homogénea en torno a valores de  $\lambda$  de entre 1,4-1,6.

Como resultado, el objetivo de LBDI es la reducción en el octanaje requerido del combustible gracias a la inyección directa y el exceso de aire como supresor de la auto detonación o picado en el motor.

Este sistema permite realizar operaciones en el motor a relaciones de compresión aproximadamente 1,5 mayores que aquellas realizadas con sistemas de inyección directa sobrealimentados convencionales.

### 6.1.2 Ventajas e inconvenientes

Las ventajas principales de la inyección en modo pobre de combustible son:

- Reducción considerable de las emisiones de NOx. El exceso de aire introducido en la cámara de combustión, provoca que el proceso de combustión se realice a una menor temperatura y como consecuencia una menor producción de NOx.
- Aumento de la eficiencia térmica debido a una reducción en las pérdidas de calor.

Desventajas:

- Aumento de la producción de NOx en regiones cercanas a  $\lambda = 1-1.2$ .
- Necesidad de un sistema eficiente de tratamiento de gases de salida.
- Arranque en frío y operaciones transitorias : Necesidad de mejora.
- Dificultad en el control de la estabilidad de la combustión en un rango concreto.
- Este modo se encuentra limitado por la estabilidad de la combustión.

## 6.2 Distribución de válvulas variable

Conocida en inglés por las siglas VVT (Variable valve timing), es un sistema que hace variar el tiempo de apertura y cierre de las válvulas de admisión y de escape del motor, en función de las condiciones de régimen y carga del motor con el objetivo de optimizar el proceso de renovación de la carga, que trae consigo un aumento en el rendimiento volumétrico y una mayor economía en el consumo de combustible.

Este sistema fue patentado por el fabricante de automóviles Fiat a finales de 1960 y Alfa Romeo el primer fabricante que utilizó este sistema VVT en el Alfa Romeo Spider 2000. Actualmente gran parte del mercado automovilístico emplea este sistema junto con otro sistema conocido como Variable Valve Lift (VVL) que consiste en la elevación variable de las válvulas de admisión y escape del motor. Existen diferentes denominaciones según la marca de vehículo a la que se esté refiriendo.

Durante el proceso de funcionamiento del motor, hay un momento, en el que ambas válvulas se encuentran abiertas a la vez ( conocido como cruce de válvulas). Por lo tanto, este sistema permitirá adaptar el tiempo de

cierre y apertura de las válvulas sincronizándolo con las condiciones de velocidad del motor. En zonas de bajas rpm, un cruce de válvulas reducido favorecerá un ralentí bajo y con esto, menores emisiones. A altas rpm, se dispone de poco tiempo, por lo tanto se requiere un mayor cruce de válvulas, especialmente a alta carga del motor. Al modificar el tiempo entre apertura y cierre de las válvulas, variará el llenado del motor con la mezcla de aire-combustible, obteniendo en ambas situaciones un comportamiento más óptimo para la combustión.

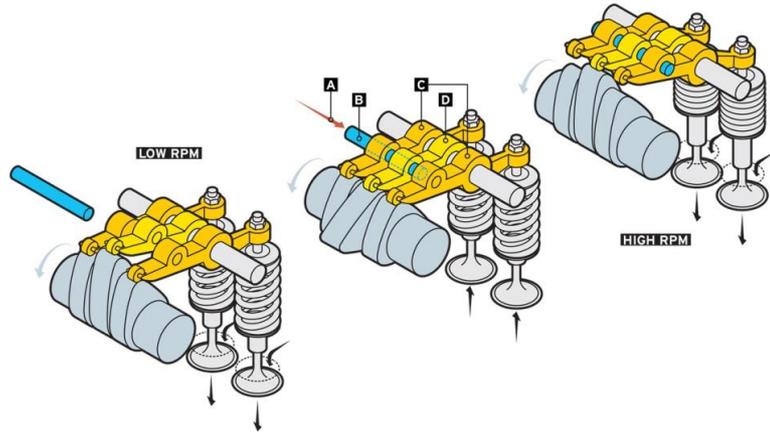


Ilustración 6-2: Sistema VTEC de Honda de distribución de válvulas variable

El principio de funcionamiento consiste en variar el accionamiento del árbol de levas, que por un lado consigue cambiar su configuración avanzando entre 25° y 50°, y de esta manera variar los tiempos de apertura y cierre de válvulas mientras que, por otro lado, para conseguir diferentes geometrías de levas y de esta manera variar el ángulo de movimiento consiguiendo, aumentar o disminuir la apertura de las válvulas.

### 6.3 Combustión por difusión a baja temperatura (LTC)

También conocida en inglés como Low Temperature Combustion (LTC) es un proceso de combustión no convencional propuesto para los motores de inyección directa diesel con el objetivo principal de reducción de las emisiones contaminantes de NOx y de la cantidad de partículas. Los principales parámetros que controlan la formación de NOx y partículas son la temperatura de llama (temperatura local) y la relación aire-combustible ( $\lambda$ ).

La principal idea de la combustión por difusión a bajas temperaturas es crear procesos de combustión en áreas de  $\lambda$ -T donde la formación de NOx y hollín no es crítica.

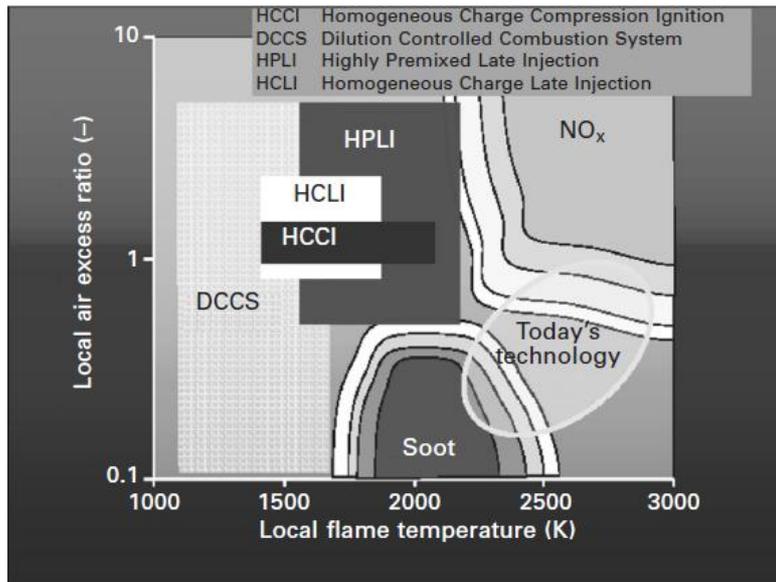


Ilustración 6-3: Regiones principales de formación de NO<sub>x</sub> y hollín

Actualmente, existen numerosos métodos de combustión a baja temperatura algunos de ellos ya desarrollados y otros en plena investigación para su desarrollo. Los más conocidos son:

- Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI).
- Dilution Controlled Combustion System (DCCS).
- Highly Premixed Late Injection (HPLI).
- Homogeneous Charge Late Injection (HCLI).

Todos estos métodos de combustión se aplican únicamente a cargas parciales. Las características comunes de estos métodos de inyección son:

- Combustión premezclada.
- Falta de información para el control preciso de la combustión.
- Altas tasas de presión.
- Elevadas emisiones de HC y CO.
- Escasas emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas.

### 6.3.1 Combustión convencional en MEC

Los procesos que afectan a la combustión y formación de contaminantes en los diferentes motores diesel de inyección directa convencionales pueden variar ampliamente en todo su mapa de condiciones de

funcionamiento y en las geometrías del motor. Por consiguiente, existe un gran "mapa conceptual" de la combustión directa diesel convencional, con diferentes características según el modelo de motor y su año. Sin embargo, en la mayoría de estos prevalecen tres características principales:

- El proceso de combustión coincide temporalmente con parte del proceso de inyección de combustible. Por lo tanto el retraso del encendido es relativamente corto. Este típico modo de combustión diesel varía de cargas moderadas a altas según las condiciones.
- Chorro libre de combustible. Durante la inyección de combustible, los inyectores propagan el chorro de combustible de forma relativamente libre en el interior de la cámara de combustión hasta que este interactúa con las superficies del cilindro.
- Una sola inyección de combustible por ciclo del motor.

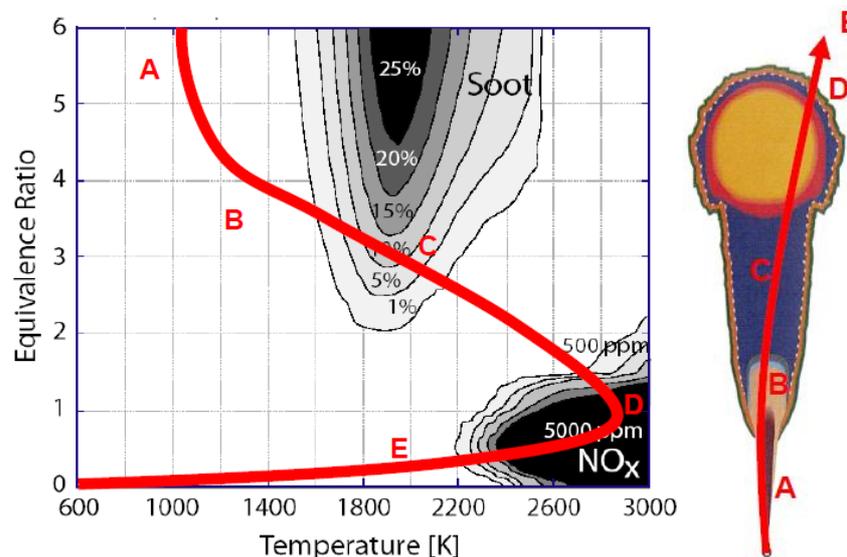


Ilustración 6-4: Diagrama distribución del proceso combustión convencional diesel: NOx y PM

### 6.3.2 Combustión diesel a baja temperatura no simultánea a la inyección

Esta es una de las estrategias de combustión por difusión a baja temperatura. Este proceso de combustión crea una imagen muy distinta de la formación de contaminantes del cilindro a la descrita anteriormente. Este subconjunto de LTC comienza a desarrollarse hace más de una década y sus características más generales son:

- Este tipo de combustión se aplica principalmente a cargas bajas.
- Combustión a baja temperatura por dilución de EGR. La baja temperatura necesaria para reducir las emisiones se puede lograr con una mezcla muy pobre de combustible o con la dilución de la carga de admisión mediante EGR. El primero mencionado correspondería al método HCII, que tiene un enfoque prometedor de cara a futuros desarrollo.

- Inyección antes o después que en el sistema convencional, pero con el inicio de la combustión después del final de la inyección.
- Múltiples inyecciones de combustible.

### 6.3.3 Combustión diesel a baja temperatura simultánea a la inyección

También conocida como combustión diesel cuasi-estable de baja temperatura, esta es la segunda de las variantes de la combustión por difusión a baja temperatura. La principal característica de este tipo de combustión es que durante la combustión, la inyección de combustible continúa. Esto es debido a condiciones de funcionamiento con cargas altas, ya que las duraciones de la inyección en este caso pueden exceder el retraso del encendido, incluso con EGR, y especialmente cuando la inyección se produce cerca del punto muerto superior.

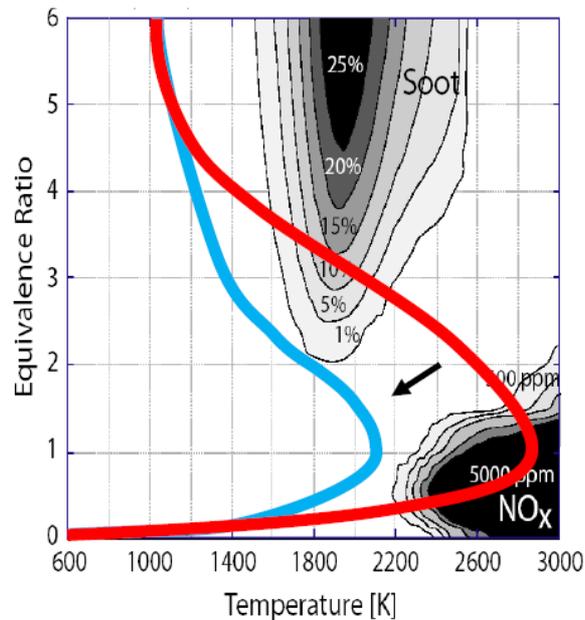


Ilustración 6-5: Diagrama LTC: reducción emisiones NOx y PM

## 6.4 HCCI/CAI

A partir del año 2001 en adelante surgieron los primeros prototipos de motores que recurrieron al autoencendido controlado de la mezcla de aire y combustible. Esta tecnología es conocida como HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition; encendido por compresión de carga homogénea, en español) o CAI (Controlled Auto Ignition; autoencendido controlado, en español). Estos motores tienen dos modos de funcionamiento, a altas cargas funcionan como un motor normal, mientras que a baja carga el encendido de la mezcla se produce por la compresión de ésta.

Esta tecnología ha tenido un mayor desarrollo en los motores diesel, mientras que, en los motores gasolina, poco a poco se han introducido ciertos modelos en el mercado, aunque aún se encuentra en pleno

desarrollo.

#### 6.4.1 Principio de funcionamiento

Similar a un motor convencional de encendido provocado, en un motor con funcionamiento HCCI/CAI el combustible y el aire se mezclan bien en el sistema de admisión o bien en los cilindros mediante la inyección directa. A continuación la masa premezclada de aire y combustible se comprime y hacia el final de la carrera de compresión, la combustión se inicia mediante el autoencendido, de manera similar a los motores de encendido por compresión convencionales. La temperatura de la carga tiene que incrementarse durante el inicio de la compresión para alcanzar las condiciones de encendido automático al final de esta. Esto puede hacerse mediante:

- El calentamiento del aire de admisión.
- Manteniendo parte de los productos de la combustión en el cilindro.
- Reintroduciendo parte de los gases de escape en el cilindro.
- Incrementando la relación de compresión.
- Inducción forzada.
- Momento de la inyección en MEP de inyección directa.

Todas estas estrategias obtienen como resultado una mayor temperatura de la mezcla durante el proceso de compresión, por lo que a su vez se aceleran las reacciones químicas en el combustible mezclado homogéneamente.

En un motor HCCI ideal, el autoencendido y la combustión tendrán lugar en toda la cámara de combustión de forma simultánea, resultando en una alta tasa de liberación de calor y con ello de energía. Esto produce altas presiones en el interior del cilindro que pueden producir su deterioro. Por esta razón, el proceso HCCI se emplea generalmente durante cargas bajas del motor.

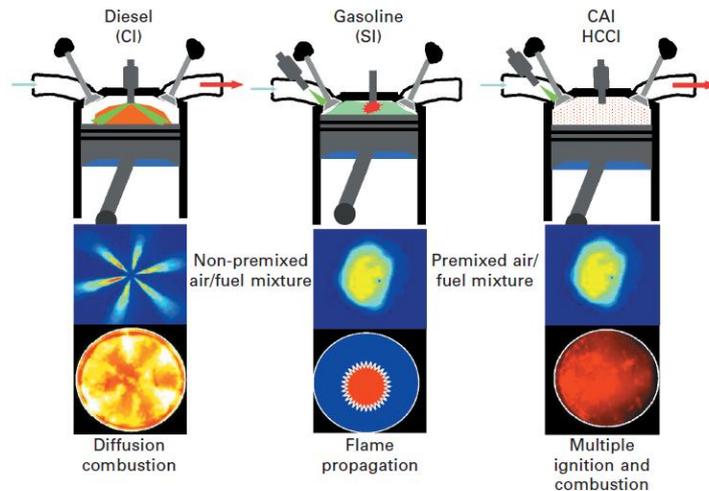


Ilustración 6-6: Modos de combustión

## 6.4.2 Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Desde que los motores HCCI son de mezcla homogénea pobre, los motores de encendido por compresión (MEC) pueden operar con relaciones de compresión mayores de 15:1, logrando así un 30% más de eficiencia que en un motor de encendido por chispa convencional.
- La homogeneidad en la mezcla de aire y combustible conduce a una combustión más limpia y a menores emisiones. Esto es debido a que las temperaturas máximas son significativamente menores que en un MEC convencional.
- Emisiones insignificantes de NO<sub>x</sub> y partículas. Es la ventaja principal.
- Los motores HCCI pueden funcionar sobradamente con combustible diesel, también con gasolina (actualmente en desarrollo) e incluso con combustibles alternativos como el gas natural.
- El sistema HCCI evita pérdidas por bombeo de la mariposa en el caso de los MEP, aumentando así su eficiencia.

Inconvenientes:

- Dificultades para conseguir el arranque en frío.
- Altas tasas de liberación de calor y de aumento de la presión en el cilindro que contribuyen a un alto desgaste del motor.

- Dificultad de controlar el proceso de ignición. A diferencia de los MEP controlados por una bujía o de los MEC controlados por la presión de inyección.
- Los motores HCCI tienen rangos pequeños de potencia efectiva. Esto es debido a las restricciones que ocurren a cargas bajas, limitados por la inflamabilidad de la mezcla pobre o a cargas altas, limitados por las altas presiones.
- Aumento de las emisiones de CO y HC debido a la oxidación incompleta (producida por una combustión muy rápida y a la disminución de temperatura en el cilindro.).
- Necesidad de sistemas de tratamiento de gases de escape más sofisticados que en los MEP o MEC convencionales.
- Necesidad de un sistema de control de alta potencia.

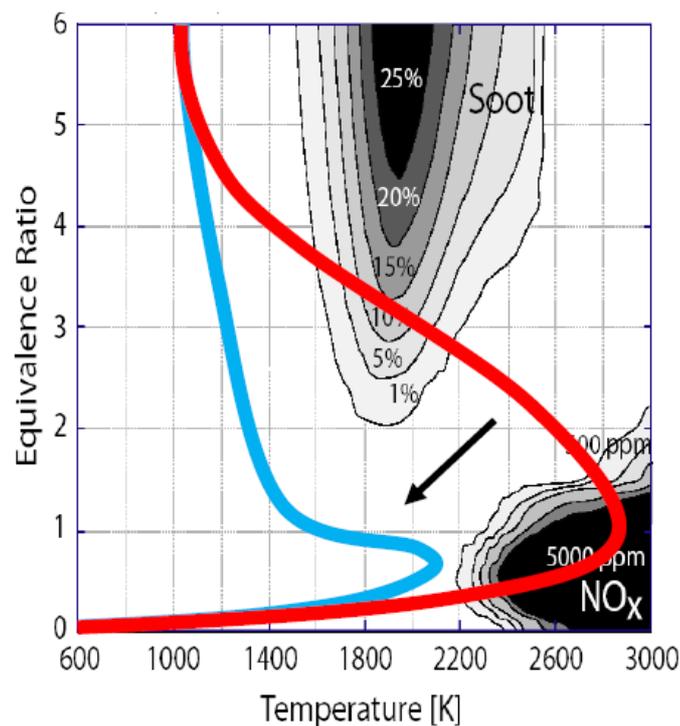


Ilustración 6-7: Proceso combustión HCCI vs diesel convencional: Disminución en NOx y PM

### 6.4.3 Control HCCI

El proceso de combustión HCCI es más difícil de controlar que los procesos llevados a cabo en los MEP o MEC convencionales. En los MEP, la ignición comienza con una chispa y en los MEC, comienza con la inyección de combustible en el aire pre-comprimido. En ambos casos, la sincronización de la combustión se controla de forma explícita. Sin embargo, en un motor HCCI, la homogeneidad de la mezcla de aire y

combustible es comprimida y encendida cuando hay cierta presión y temperatura en el interior del motor. Esto significa que no hay un método directo bien definido para el inicio de la combustión. Por ello, se necesita un amplio sistema de control que regule tanto la relación de compresión necesaria, la temperatura de entrada de los gases recirculados, la relación aire-combustible etc. Los principales enfoques de control son:

- Relación de compresión: Esta se puede modificar con unas válvulas de admisión variable (VVT; variable valve timing en inglés). Este enfoque requiere mayor energía para lograr una rápida respuesta, además es caro pero es muy efectivo.
- Modificación de la temperatura: Como el sistema HCCI es muy sensible a la temperatura, se puede modificar esta a conveniencia para conseguir la auto ignición. El método de control de temperatura más simple es el uso de resistencias a la entrada, pero este enfoque es demasiado lento para cambiar de un ciclo a otro. Otro método a destacar es variar la temperatura de la carga de admisión de aire, mediante mezcla de corrientes de aire frío y caliente. Este proceso es mucho más rápido para el control del ciclo que el anterior.
- Regulación en el EGR(%): El uso de EGR tiene efectos sobre el proceso HCCI. El primero es que diluye la carga fresca (si los gases de escape son recirculados al colector de admisión), retrasando el encendido. El segundo es que el conjunto de gases de escape calientes (retenidos en el motor) aumentan la temperatura de la mezcla en el cilindro controlando así el encendido.
- Actuación de las válvulas: Mediante el conocido accionamiento de válvulas variables (VVA), que consigue un control más preciso de la temperatura y presión en la cámara de combustión. Esto se consigue debido al control de la relación de compresión, regulando el momento en el que se cierra la válvula de admisión o controlando la cantidad de gases de escape retenidos en la cámara de combustión mediante los juegos de válvulas de entrada y salida. Este sistema es caro, pero muy eficiente, y con una tendencia en alza en su uso en la actualidad.

## 6.5 Recirculación de gases de escape (EGR)

La principal función de este sistema consiste en redirigir una parte de los gases de escape de los motores de combustión hacia el colector de admisión, para reducir principalmente las emisiones de NOx.

Se comenzó a utilizar a principios de 1970, pero es en las últimas dos décadas donde ha tenido una mayor implantación en los motores diesel y actualmente en los motores de gasolina de inyección directa debido a la evolución de las normativas sobre emisiones y por la preocupación por la disminución de las reservas de combustible.

El objetivo de esta recirculación es disminuir la temperatura de entrada de la carga al motor, para de esta manera conseguir mayores relaciones de compresión y una mejor eficiencia térmica.

### 6.5.1 Características del sistema

Dentro de las características del EGR, hay que hacer una distinción entre:

- EGR interno, que está determinado por la sincronización de las válvulas y el gas residual.
- EGR externo, que se dirige hacia la cámara de combustión a través de líneas adicionales y una válvula de control.

Las principales causas por las cuales se experimenta una alta reducción en las emisiones de NOX son:

- Reducción del flujo másico de gases de escape.
- Reducción de la presión parcial del oxígeno o del factor de exceso de aire local.
- Caída en la tasa de combustión y, por lo tanto, disminución de las temperaturas pico debido al aumento de gases inertes en la cámara de combustión.
- Reducción en las pérdidas por bombeo, debido a que la mariposa de entrada en la inyección directa está abierta en casi todo momento.

Con un aumento alto en la tasa de EGR(%), se producirá una reducción muy considerable debido a las consecuencias mencionadas anteriormente. La cantidad de gases de escape recirculados también afecta al período de retraso del encendido.

Los principales beneficios del uso de EGR son:

- Menor formación de NOx gracias a la menor temperatura de llama. Esto es debido a que el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O recirculados tienen un mayor calor específico y por lo tanto la temperatura de combustión será inferior.
- Alternativa eficaz como supresor de la autodetonación.
- Pequeña mejora del par motor.
- Ahorro combustible a altas velocidades y cargas de hasta un 12%.

En cambio, el uso del EGR conlleva:

- Aumento de las emisiones de CO.
- Aumento de las emisiones de HC.
- Necesidad de medidas de postratamiento de gases más eficaces.

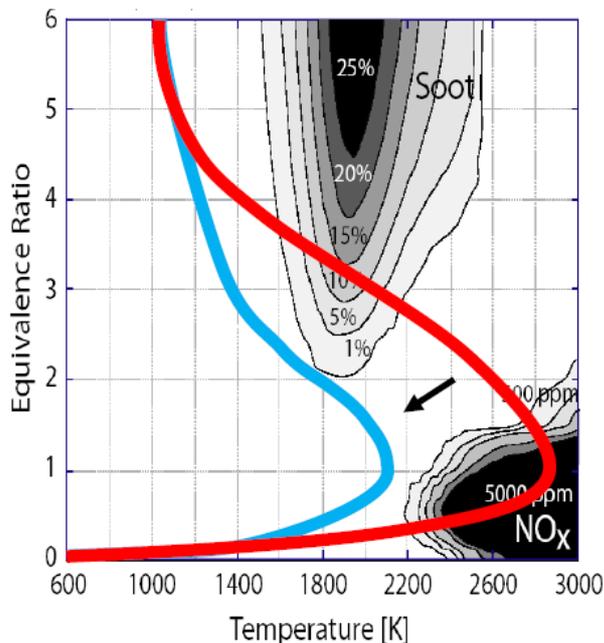


Ilustración 6-8: Efecto del EGR sobre la emisión de NOx y PM

## 6.5.2 Tipos de circuitos EGR

-EGR de alta presión: Estos son los actuales EGR que se encuentran en mayor producción en el mercado.

- **Modo de operación:** Los gases de escape son recirculados antes de llegar a la turbina de escape hacia el colector de admisión a través de un mezclador hasta después del compresor. El volumen de EGR dependerá de la diferencia de presiones entre el gas de escape de la turbina de contrapresión, la presión del colector de admisión, y la posición del accionamiento eléctrico o neumático de la válvula del EGR. En este caso, la válvula de control de EGR se sitúa lo más cerca posible de las lumbreras de admisión para permitir un rápido cierre de gases y minimizar la suciedad dentro de la ruta del aire de admisión. En los vehículos del mercado, la presión de recirculación de gases de escape es la adecuada con el programa de mapeado de emisiones del motor. Solamente en los puntos de carga más baja es necesario restringir el flujo de gas en el lado del colector de admisión para lograr tasas suficientemente altas de EGR. Por ello en motores de camiones, se toman ciertas medidas como añadir turbocompresores de geometría variable (VTG) o mezcladores de venturí para implementar el funcionamiento del EGR.
- **Control:** Actualmente el control de la cantidad de gases de escape recirculados se realiza midiendo la masa de aire de entrada y puede hacerse más preciso combinando esto con un control de la expresión de lambda de bucle cerrado.
- **Ventajas:** Mayor durabilidad del compresor, mayor eficiencia del compresor y minimización de volumen muerto en el EGR.

- Desventajas: Dificultad en el reparto equitativo del EGR entre los cilindros y alto régimen de refrigeración del EGR.

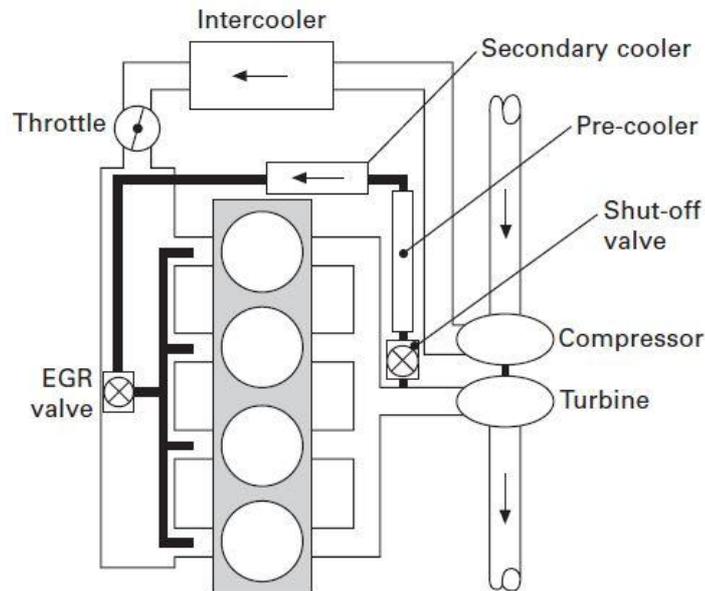


Ilustración 6-9: Esquema motor con EGR de alta presión

-EGR de baja presión: El uso de este tipo de EGR podrá combinarse en un futuro próximo con el uso del EGR de alta presión.

- Modo de operación: Los gases de escape procedentes de la cámara de combustión se dirigen hacia la salida de la turbina, para después llegar al sistema de tratamientos de gases de escape, siendo recirculados hacia la entrada del compresor justo antes de abandonar el motor.
- Ventajas:
  - Menor necesidad de enfriamiento del EGR.
  - La distribución uniforme de EGR entre los diferentes cilindros.
  - Mayor enfriamiento de la mezcla homogénea de gases de escape y aire después del paso a través del compresor y el intercambiador.
- Desventajas:
  - El EGR de baja presión es menos favorable debido al mayor volumen de gases de escape contaminados en funcionamiento dinámico.
  - Menor durabilidad del compresor.
  - Mayor tamaño del compresor.
  - Incremento del volumen muerto en el EGR.

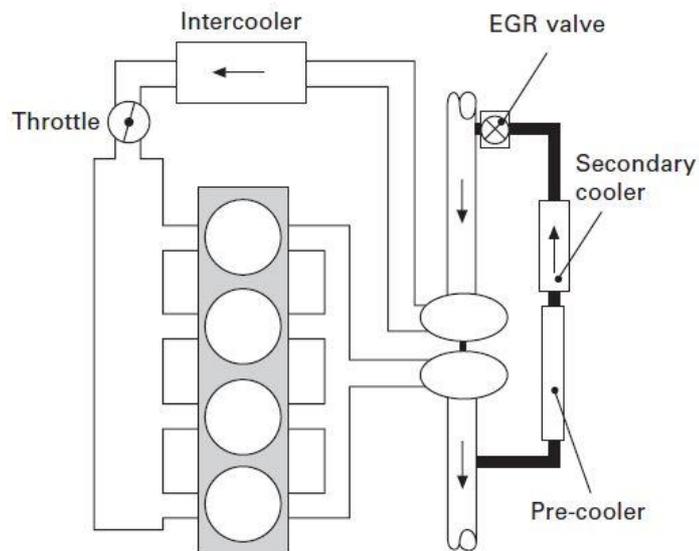


Ilustración 6-10: Esquema motor con EGR de baja presión

-EGR híbrido: Podría considerarse una mezcla de los dos anteriores, pero con más parecidos al circuito de baja presión.

- Modo de operación: En este caso, los gases de escape son recirculados a la salida del colector de escape, justo antes de llegar a la turbina. A continuación estos gases de escape pasan por los intercambiadores de calor, para disminuir su temperatura y finalmente son introducidos antes de llegar a la entrada del compresor. La válvula EGR se sitúa cerca de la entrada del compresor.
- Ventajas:
  - Alta tasa de recirculación de EGR(%).
  - Distribución equitativa del EGR entre los diferentes cilindros.
- Desventajas:
  - Menor durabilidad del compresor.
  - Menor eficiencia del compresor.
  - Incremento del tamaño del compresor.
  - Alta demanda en la refrigeración de los gases de escape.
  - Mala respuesta en transitorios.

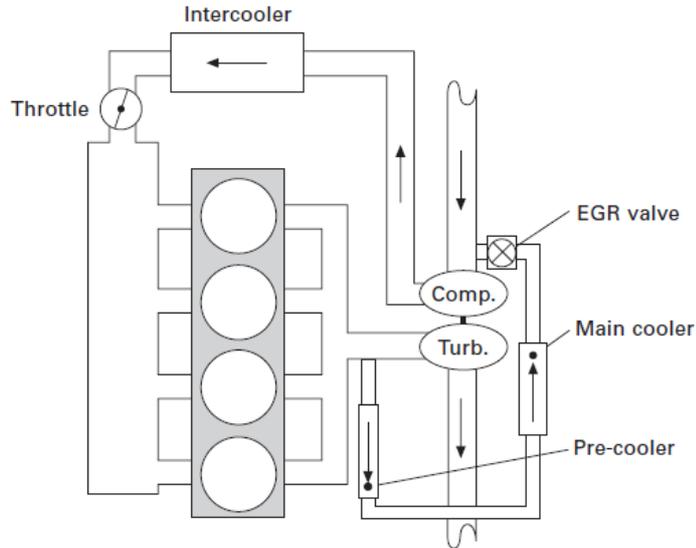


Ilustración 6-11 Esquema motor con EGR híbrido

En los tres casos, existen intercambiadores de calor para la refrigeración de los gases de escape con el fin de mejorar los efectos del EGR. En general, el efecto de los mayores factores de exceso de aire se anula debido al aumento de la densidad de la carga y con esto, se reducen las temperaturas máximas a causa del descenso de la temperatura final de compresión.

Por lo general, la refrigeración de los gases de escape recirculados a altas tasas de EGR, conducen a la inestabilidad de la combustión. Esto se traduce en un aumento considerable en las emisiones de HC y CO. Un enfriador de EGR conmutable sería ideal para aumentar la temperatura en la cámara de combustión, y estabilizar la combustión, reduciendo las emisiones de HC y CO no tratadas. En concreto, esto ocurre en los arranques en frío, donde el catalizador aún no ha alcanzado su temperatura de trabajo.

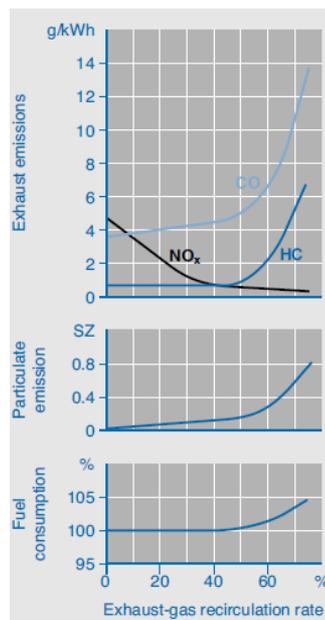


Ilustración 6-12: Influencia del EGR(%) en emisiones y consumo

## 6.6 Sobrealimentación en MCI

La sobrealimentación ha acompañado a los motores de combustión interna alternativos desde los principios de la automoción. El primer diseño de un compresor para ser aplicado a un motor de combustión interna fue de Gottlieb Daimler y lo hizo en el año 1885. Desde entonces y hasta el día de hoy, la historia de la sobrealimentación ha ido fluyendo a la par que los motores de combustión interna.

A pesar de sobrealimentar motores de tiempos inmemoriales, la industria donde mayor evolución e implantación tuvo la alimentación forzada fue la aeronáutica. Los motores de pistones que utilizaban los aviones perdían rendimiento a medida que aumentaban la altura a la que volaban al bajar la presión y densidad del aire, por lo que para compensar, se optó por montar compresores mecánicos y turbocompresores a aquellos motores.

De ahí a pasar a los motores de la automoción como manera de extraer más potencia de los motores existentes, no hubo nada más que un corto paso. En la actualidad tenemos una de estas máquinas adosada a prácticamente la totalidad de los motores diesel, los motores de gasolina más prestacionales y cada vez más en las opciones más asequibles, gracias a su importancia en el concepto del *downsizing*.

Un motor atmosférico tiene un límite de potencia que normalmente determinan varios factores, entre ellos uno de los más importantes es la cantidad de aire que puede aspirar a través de su sistema de admisión. Para aumentar la potencia hay que aumentar la cantidad de aire que entra en los cilindros y a la par inyectar más combustible.

Cuando se sobrealimenta un motor, es importante también que el sistema de alimentación de combustible esté preparado para aumentar el caudal de combustible que fluye al interior de los cilindros, si no el motor funcionará con una mezcla pobre  $\lambda > 1$ , sobrecalentándose y no pudiendo entregar toda la potencia que debería.

La sobrealimentación de un motor utiliza medios mecánicos o aprovecha la dinámica de los gases, ya sea de escape o de la propia admisión para aumentar la cantidad de aire que entra en los cilindros. De esta manera los motores tienen más potencia y normalmente son más eficientes.

### 6.6.1 Tipos de sobrealimentación

La alimentación forzada de aire a los motores ya tiene bastante historia y por lo tanto los tipos que hay son cuanto menos numerosos y cada uno tiene bastantes subtipos. La complejidad y efectividad ha ido en aumento en estos años.

En primer lugar, hay que diferenciar entre sobrealimentación interna o externa. Los métodos de sobrealimentación interna se dividen en motores que tienen o no compresor y en motores que aprovechan o no los gases de escape. A continuación se describirán estos métodos en profundidad:

Alimentación forzada dinámica:

Esta sobrealimentación utiliza las propiedades dinámicas de los gases para por medio de ondas de choque, inercias de los gases y resonadores introducir más aire dentro de los cilindros. Su efectividad no es muy alta, pero algunos coches utilizan admisiones de aire variables que se aprovechan de estas propiedades para mejorar ligeramente la capacidad de meter aire en sus cilindros.

Entre otros sistemas de este tipo destacan aquellos que orientan su admisión en dirección de la marcha, haciendo que una mayor cantidad de aire entre en la admisión y aumentando, muy ligeramente, la potencia del motor. Este sistema se utilizó en varios coches de los años sesenta, pero actualmente no se utiliza, en parte por la dificultad de instalación y la influencia en la aerodinámica que tendría una boca abierta en

dirección de la marcha.

Sobrealimentación mecánica:

La sobrealimentación mecánica se basa en el uso de compresores con un sistema de tracción mecánica, normalmente mediante correas, engranajes o cadenas acopladas rígidamente al motor.

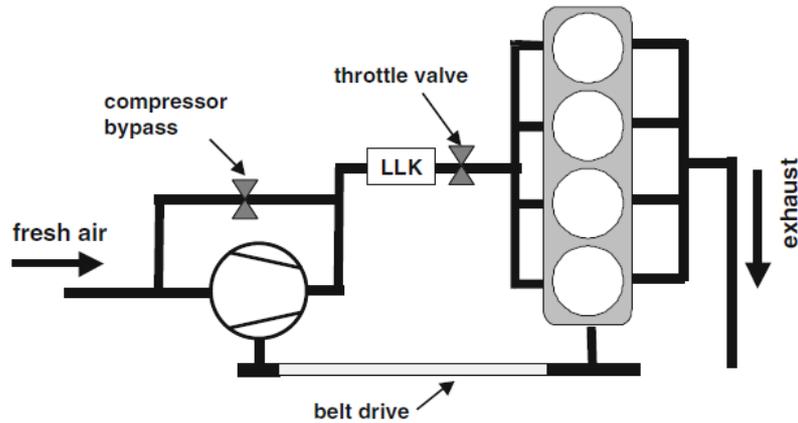


Ilustración 6-13: Esquema sobrealimentación mecánica

A lo largo de los años, se han implementado diferentes soluciones de diseño para los turbocompresores mecánicos, pero todos ellos tienen ciertos puntos comunes:

- Trabajan siempre entre dos límites de volumen fijados.
- Debido a su funcionamiento discontinuo, existen efectos acústicos en los casos de apertura brusca.
- El flujo de volumen absorbido aumenta aproximadamente en proporción con la velocidad del motor.
- Su mapa de rendimiento es estable a bajas velocidades y altas presiones, a pesar de ciertos aumentos en las fugas.
- Todos los diseños tienen como resultado el mismo perfil característico de líneas de velocidad constante en el mapa de presión contra caudal.

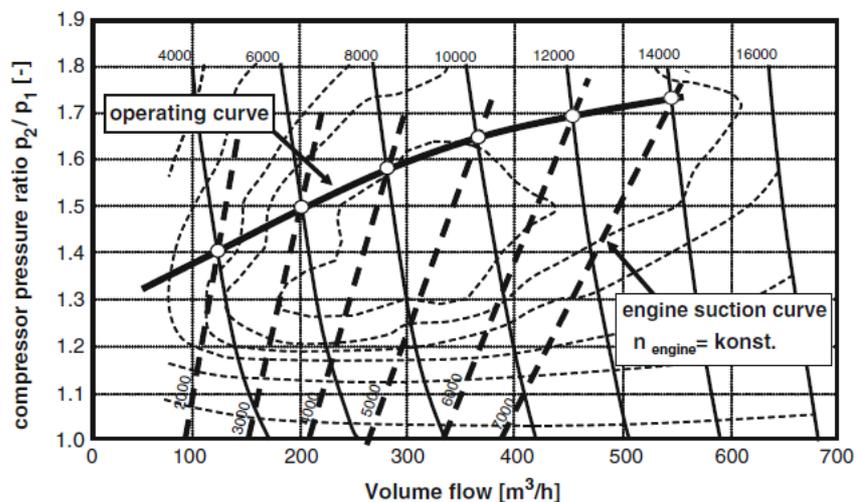


Ilustración 6-14: Mapa y línea de operación del compresor mecánico

Como se puede observar en la Ilustración 6-14, las líneas de velocidad constante del compresor en el mapa se inclinan hacia arriba de izquierda a derecha. Con estos compresores se puede alcanzar relaciones de compresión de 2:1. Esta figura muestra también la capacidad de succión del flujo de aire que entra al motor para un diseño característico del mapa. La línea de operación trazada en el mapa determina el funcionamiento a plena carga del motor. Por lo tanto, el flujo de aire de entrada se tendrá que ajustar para que haya un funcionamiento óptimo del motor.

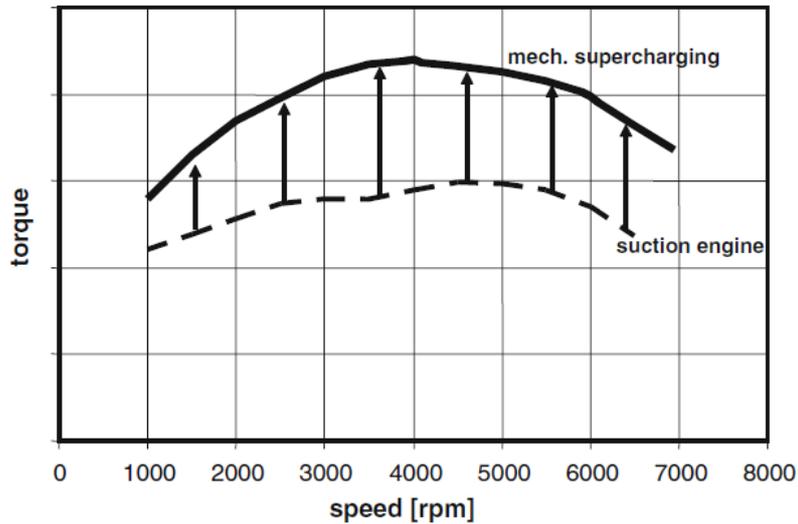


Ilustración 6-15: Par motor: Aspiración natural, sobrealimentación mecánica

La figura anterior muestra las características de un motor de encendido provocado sobrealimentado mecánicamente en comparación con un motor atmosférico de la misma capacidad. Se puede apreciar que se consigue un par mayor sobretodo en el intervalo de velocidades entre 3000 y 5000 r.p.m.

Para terminar con la sobrealimentación mecánica, se presentarán sus ventajas e inconvenientes.

-Ventajas:

- Respuesta rápida ante cambios bruscos de carga.
- Altas presiones de sobrealimentación a baja velocidad del motor limitadas al bombeo producido.
- No requiere cambios en el sistema de escape, únicamente en el de admisión.
- La contrapresión en el escape no influye en el intercambio de gases.
- No existen efectos adversos en el comportamiento de respuesta de los sistema de postratamiento de gases de escape en los arranques en frío o en la inestabilidad de ciertos procesos.

-Inconvenientes:

- El consumo específico del combustible a cargas parciales sin un adecuado control puede ser mayor que en motores de aspiración natural.

- Altos costes en diseño y control para la disminución de potencia del compresor (Acoplamiento, cambio de régimen y válvulas de control).
- Retraso en la respuesta ante ciertos requisitos de carga repentinos.
- Ruido debido al funcionamiento irregular con la consecuente pérdida de eficiencia.
- Pérdidas por rozamiento durante el accionamiento del compresor.

#### Turbosobrealimentación:

En la turbosobrealimentación, el compresor se encuentra equipado con una turbina que aprovecha la energía de los gases de escape. Los gases de escape del motor pasan por el colector de escape hacia la turbina y de aquí esta genera un movimiento mecánico en un eje conectado con el turbocompresor que este aprovecha para su funcionamiento y de esta forma comprimir el aire de entrada. La regulación de potencia de la turbina se realiza a través de la válvula "wastegate".

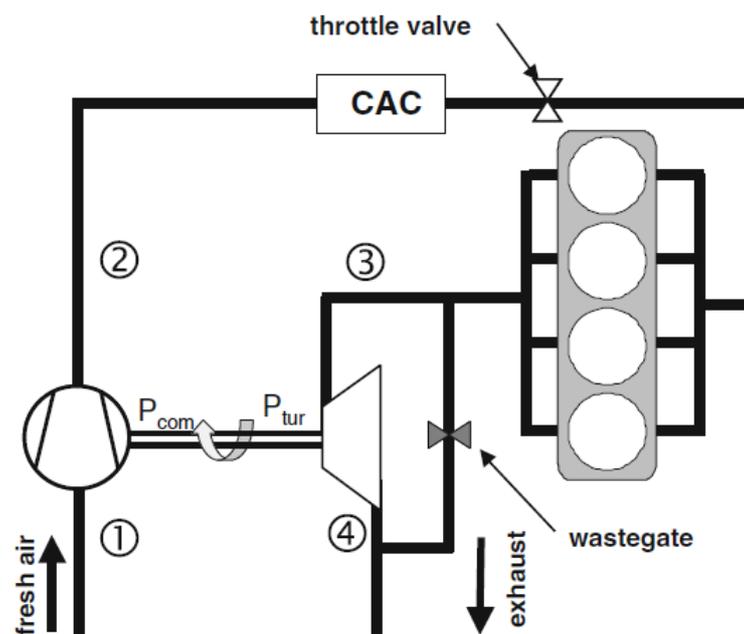


Ilustración 6-16: Esquema básico de la turbosobrealimentación de un motor

Esto se transforma en un aumento en la potencia y en la eficiencia del motor. La mayoría de los motores diesel que montan los automóviles actuales cuentan con un turbocompresor. También los motores gasolina de la corriente downsizing tienden a montarlos, ya que con una cilindrada pequeña y aplicando un turbo se pueden obtener grandes resultados en cuanto a potencia, eficiencia y consumo de combustible. Por no hablar de las versiones más prestacionales que montan turbos a sus motores de gasolina como manera de obtener potencia bruta y altas prestaciones.

La turbosobrealimentación puede dividirse en turbosobrealimentación a presión constante o en turbosobrealimentación a pulsos:

- En la turbosobrealimentación a presión constante, solo se aprovecha la energía térmica del escape. La presión constante antes de la turbina, por una parte, tiene un efecto positivo sobre la eficiencia media y sobre el comportamiento de succión de la turbina pero, por otro lado, esto provoca mayores pérdidas debido al no aprovechamiento de la energía cinética en el escape.
- En la turbosobrealimentación por pulsos, el objetivo es dirigir los gases de escape a la turbina en el menor tiempo posible y con la consecuente menor pérdida de energía posible. En este caso tanto la energía térmica como cinética son aprovechadas en el escape. Por otro lado, los gases de escape se propagan a velocidad sónica y esto afectará con contrapresiones en el escape que tienen un efecto negativo en la eficiencia y sobre la resistencia térmica y mecánica de la turbina.

En estos sistemas, el principal método de control de la carga que entra a la turbina de escape, se realiza a través de unas válvulas a la salida del colector de gases de escape (wastegate).

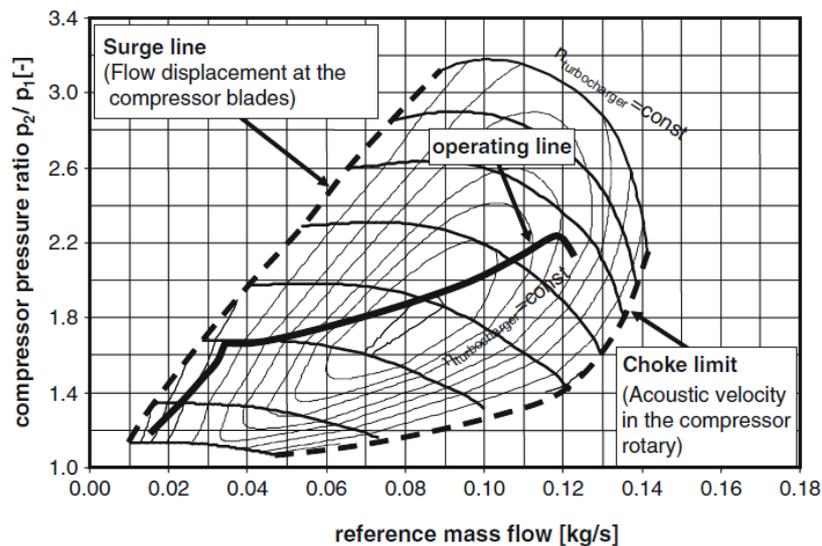


Ilustración 6-17: Mapa y línea de operación de un turbocompresor

La figura anterior muestra el mapa de características de un turbocompresor con sus límites. El funcionamiento a plena carga es descrito con la línea de operación de la figura, que aumenta casi exponencialmente de izquierda a derecha.

Además, la turbosobrealimentación puede ser de una sola etapa, o de varias con enfriamiento intermedio.

El enfriamiento intermedio se produce para disminuir la temperatura del aire, y de esta manera obtener una mayor densidad. Además, al aumentar la temperatura de admisión aumenta el peligro de autoencendido o picado, por ello es necesario un "intercooler".

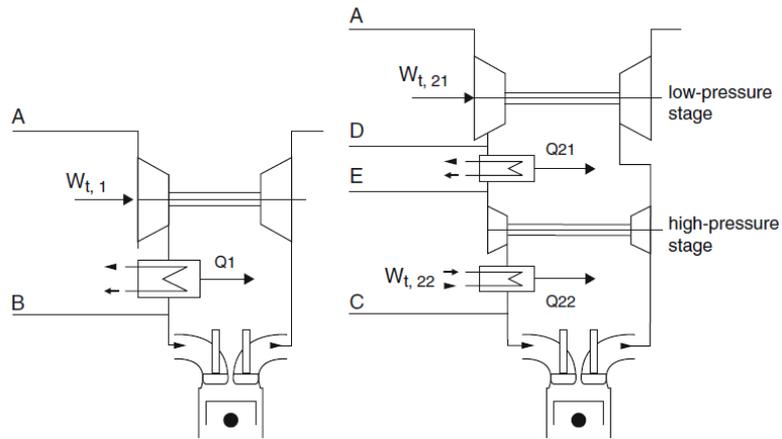


Ilustración 6-18: Turbocompresores de una etapa (izquierda), dos etapas con refrigeración (derecha)

También existe la posibilidad de realizar una turbosobrealimentación secuencial conocida como "biturbo", donde variará en una sola etapa o dos etapas en la cual existirán turbocompresores igualmente grandes o varios de diferentes tamaños. Esta aplicación se utiliza en media y alta velocidad en motores de alto rendimiento.

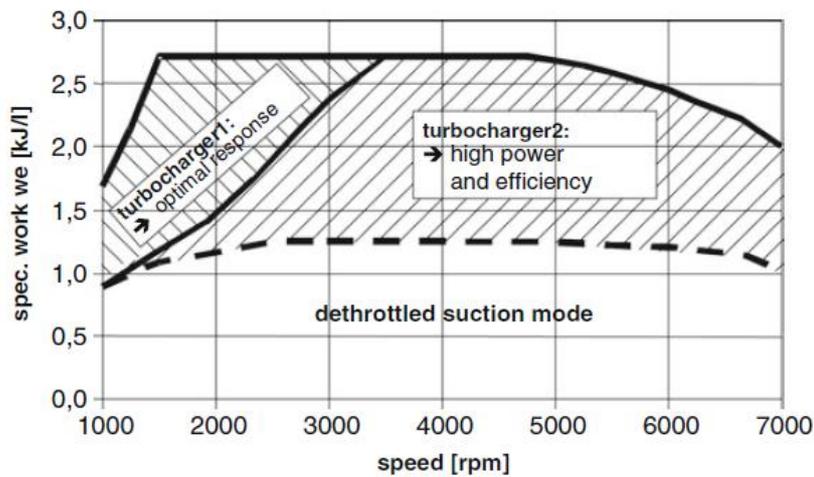


Ilustración 6-19: Mapa de funcionamiento de un turbocompresor secuencial

La figura muestra el mapa de actuación y los rangos de funcionamiento con un pequeño turbocompresor y otro más grande en un motor de alto rendimiento. El pequeño asegura un rápido tiempo de respuesta y un buen par motor a bajas velocidades, mientras que el grande proporciona buena eficiencia a altas velocidades del motor.

También cabe destacar el proceso compuesto de uso de un compresor mecánico para bajas velocidades junto con un turbocompresor adicional para el funcionamiento a media o alta cargas.

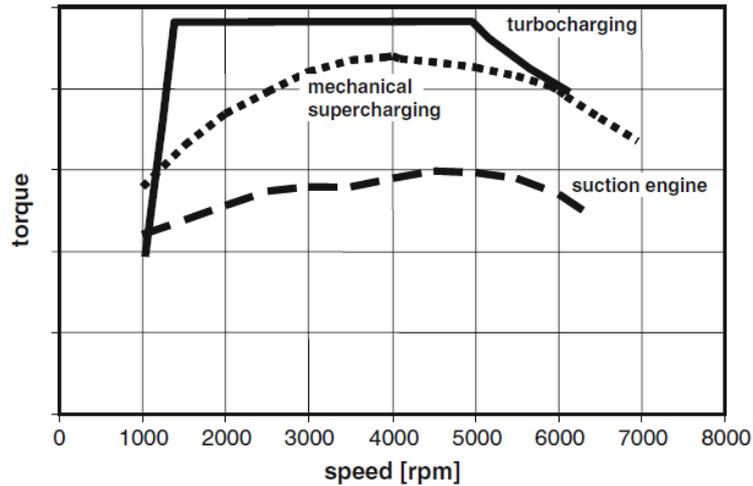


Ilustración 6-20: Comparación de tipos de sobrealimentación

La figura anterior representa la línea operativa de un turbo compresor comparado con las líneas operativas de un compresor mecánico y motor de aspiración natural. Se puede observar que a velocidades bajas (r.p.m), se alcanza un alto par gracias al turbocompresor. Cabe destacar la "meseta" en el par producida a velocidades medias, que se mantiene constante gracias al "wastegate".

Para terminar, se describirán las principales ventajas e inconvenientes de la turbosobrealimentación:

Ventajas:

- La contrapresión en el escape se reduce para cargas parciales.
- Disminución del consumo específico de combustible gracias al llamado "efecto de autorregulación" del turbocompresor.
- Tiempo de respuesta rápido.
- Reducción en el consumo de combustible.
- Bajos costes de fabricación del turbocompresor debidos a las altas cifras de producción.
- Pequeño tamaño de la unidad de sobrealimentación, con la turbina acoplada en el colector de escape se mejora el rendimiento y el tiempo de respuesta.
- Menor estrés térmico en el sistema de sobrealimentación debido a la reducción de la temperatura a través de la turbina.

Inconvenientes:

- Límite en la presión de la carga a bajas velocidades del motor debido al límite de bombeo.

- Pérdidas elevadas en el intercambio de gases y escaso intercambio de gases del motor debido a las altas presiones antes de la turbina, especialmente en diseños pequeños del turbocompresor.
- Presión de sobrealimentación reducida a bajas velocidades del motor a plena carga, debido a la escasa energía presente en el escape.
- Influencia de las medidas de postratamiento de los gases de escape en la interacción turbocompresor-motor.
- Problemas térmicos en ciertas partes del turbocompresor.
- Intervención en el control del volumen de inyección debido a la dependencia de la presión de la carga.

## 6.7 Motores de gas natural de inyección directa

En este capítulo se describirán las características de los motores de combustión interna de gas natural de inyección directa en el cilindro cercano al PMS (punto muerto superior). Existe una variedad de enfoques a la hora de construir este tipo de motor, donde se deberán de cumplir una serie de parámetros como en la relación de compresión y también requisitos del tipo el sistema de combustible. Actualmente se puede trabajar con gas natural licuado ( el más usado de esta tecnología) y gas natural comprimido. El potencial de este tipo de motores se encuentra en la posibilidad de reducir las emisiones contaminantes y en especial de carbono a la atmósfera, debido principalmente, a la creciente preocupación global por la gran contaminación de algunas zonas urbanas, donde el gas natural puede convertirse en un candidato atractivo para reemplazar total o parcialmente el petróleo como combustible para el transporte en las grandes ciudades, debido a su potencial de generar menos emisiones contaminantes que el diesel o la gasolina.

Los motores de gas natural, tienen una elevada eficiencia térmica, ya que pueden aprovechar el alto octanaje del gas natural para elevar las relaciones de compresión. Otro punto a favor es que la capacidad de mantener reguladas las emisiones de NOx o de PM es tan buena como en los motores diesel.

La inyección directa de gas natural podría usarse de apoyo en la combustión premezclada o en la combustión por difusión.

### 6.7.1 Desarrollo del motor

La inyección directa de gas natural comparte cierta tecnología del motor con la correspondiente al diesel y a la gasolina.

Existen tres posibilidades para el desarrollo de un motor de gas natural: Diseñar un nuevo motor para el propósito específico en la quema de gas natural, convertir un motor de gasolina convencional o convertir un motor diesel convencional.

Diseñar un nuevo motor ofrece la máxima flexibilidad y probablemente sea el diseño más eficiente para la operación con este tipo de combustible, pero los grandes costes en el montaje, le impiden ser

comercialmente viable, debido a que hoy en día el uso de estos motores es a pequeña escala. Por lo tanto, diseñar específicamente un nuevo motor, es poco probable en el mercado automovilístico actual y en el del futuro a corto plazo.

Rediseñar un motor de gasolina no conlleva unos costes tan altos como la primera opción. El uso de gas natural en un motor de gasolina permite un cierto aumento en la relación de compresión, pero de forma limitada. Aún así existiría un beneficio, sobre todo a carga parcial. El sistema de combustible se rediseñaría y la unidad de control electrónico (ECU) podría mantenerse, pero modificando su software.

Rediseñar un motor diesel con un sistema de gas natural es más económico que un nuevo diseño de motor. La ventaja del motor diesel en cuanto a rediseño sobre el de gasolina, es que estructuralmente es capaz de soportar mayores relaciones de compresión, aunque también este tipo de motor es más caro que los gasolina. Las principales modificaciones en el motor diesel se darían en : la sustitución del sistema de combustible, adición de un sistema de encendido y modificación de la ECU.

### **6.7.2 Relación de compresión**

En un motor de inyección directa de gas natural, la relación de compresión vendrá determinada por el arranque en frío del motor, la eficiencia del freno del motor y el límite máximo en la presión del cilindro. El arranque en frío generalmente determina el límite inferior de la relación de compresión. En el motor de gas natural, el combustible inyectado ya se encuentra en forma gaseosa, por lo tanto la vaporización del combustible no es un problema aunque serían necesarias altas temperaturas para la auto ignición del combustible, por lo tanto, es necesario el uso. La eficacia de la presión efectiva de un motor está directamente relacionada con la eficiencia térmica del ciclo diesel ideal, y también está relacionada con la fricción del motor y del cilindro con la transferencia de calor. Por norma general, al aumentar la relación de compresión aumentan la eficiencia térmica, la transferencia de calor por fricción el tamaño y coste del motor.

Por lo tanto, la relación de compresión en el motor de gas natural debe estar entre el rango de 10:1 a 24:1, donde el extremo inferior de la relación de compresión es el resultado del equilibrio entre eficiencia del freno del motor y el peso y coste del motor. Por otro lado, el límite superior esta impuesto por la máxima presión en el cilindro.

En los motores de gas natural con un consumo muy elevado, la relación de compresión se estrecha entre los rangos de 12:1 a 18:1, ya que la reducción de la relación de compresión mejora la potencia, las emisiones contaminantes y reduce ruidos y vibraciones.

### **6.7.3 Almacenamiento y suministro del combustible**

El suministro del gas natural puede darse en forma comprimida (CNG) en torno a los 200 bar o en forma licuada(LNG) a  $-160^{\circ}\text{C}$  como mínimo. Los componentes principales variarán según si el gas se encuentra en una forma u otra.

El sistema de suministro consiste principalmente en:

Un tanque de almacenamiento del combustible: Similar a los depósitos de gasolina o diesel, pero de un tamaño y estructuras diferentes, para soportar mayores presiones y temperaturas. Según el tipo de gas natural almacenado, variará el tamaño, peso y coste del depósito. Para aplicaciones en donde las distancias a recorrer son grandes, es preferible el uso de LNG (grandes camiones de transporte de mercancías), en

cambio para aquellas aplicaciones donde el repostaje de CNG sea fácilmente accesible y las distancias a recorrer sean menores, (autobuses en las ciudades) el CNG es una buena opción.

Un compresor o bomba de impulsión del combustible: En el caso del LNG son siempre necesarios para aumentar la presión de circulación del combustible, ya que normalmente el LNG se encuentra a una presión inferior a 10 bar, la cual no es suficiente para suministrar el combustible al motor. Por otro lado en el caso de CNG no es necesario el uso de un compresor, pero podría ser una opción deseable.

Un intercambiador de calor: La función principal de este es mantener estable la temperatura del combustible para que su inyección sea constante. En el caso del CNG, este sistema se usa para reducir la temperatura del gas después de su compresión. En el caso de LNG, se utiliza para vaporizar el combustible tras su elevación de presión o viceversa.

Inyectores: Similares a los del sistema de inyección directa de gasolina o diesel, con una presión de inyección de un orden de magnitud inferior a los sistemas diesel.

Sistema de válvulas, acumulador y filtros.

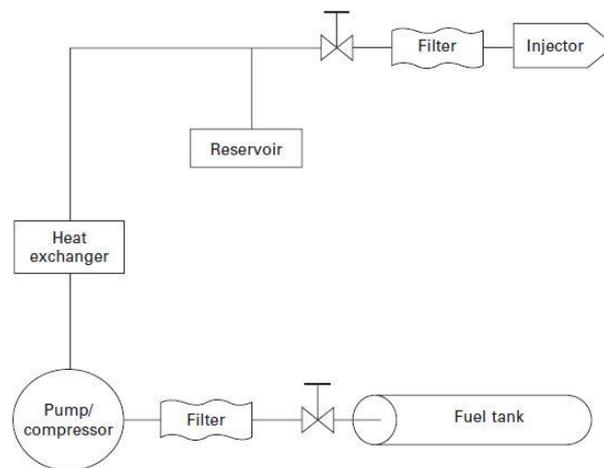


Ilustración 6-21: Sistema de suministro en un motor de gas natural

#### 6.7.4 Encendido del combustible

En un motor de gas natural, es difícil encender el combustible directamente por compresión, por lo tanto, es necesario el uso de métodos para iniciar la combustión donde destacan los siguientes, encontrados en aplicaciones de productos para el mercado y en prototipos en desarrollo:

Bujía de encendido: Ha sido usada en los motores MEP desde prácticamente la invención de estos. Dos factores son clave en el uso de la bujía en motores de gas natural: la colocación oportuna en la cámara de combustión y el momento exacto de iniciación de la chispa eléctrica. Para mejorar el funcionamiento se puede recurrir a la creación de múltiples chispas, aumentando así la eficiencia en la quema de gas natural.

Bujía de precalentamiento: Ha sido utilizada principalmente en los MEC para facilitar los arranques en frío. Este tipo de bujía genera un flujo continuo de calor que no es sensible a la presión de la cámara, y es una buena opción para los motores de inyección directa de gas natural. Para el buen funcionamiento de esta, hay que tener en cuenta su colocación, su temperatura superficial y el control de la mezcla aire-combustible.

Encendido mediante combustible piloto: El gas natural introducido en la cámara de combustión también puede ser quemado mediante la anterior quema de otro combustible, llamado combustible piloto. Se trata

de un método de encendido indirecto por compresión, y puede dividirse en un inyector por cámara, con la mezcla de aire, combustible y combustible piloto o varios inyectores separando la mezcla de aire-combustible del combustible piloto.

### **6.7.5 Combustión**

La combustión de gas natural difiere de la combustión diesel principalmente en cuatro aspectos:

Los chorros de gas natural entran en el cilindro en forma gaseosa, por lo tanto no necesitan de la fase de evaporación.

La tasa de mezcla del gas natural con el aire es más lenta debido a las diferencias en las presiones de inyección. Esto conduce a una velocidad de combustión más lenta.

El gas natural necesita de más aire para realizar el proceso de combustión, la relación aire combustible estequiométrica del gas natural es aproximadamente 17:1 y su poder calorífico es de 49MJ/kg. Por lo tanto, para generar la misma cantidad de energía, el gas natural necesita aproximadamente un 4% más de aire que el diesel.

Para lograr una eficiencia en el freno de motor similar a la del diesel, el sistema de combustión de un motor de gas natural tiene que modificarse en los siguientes parámetros respecto al motor diesel:

Configuración de la cámara de combustión.

Duración y sincronización de la inyección.

Colocación del inyector en la cámara de combustión.

### **6.7.6 Emisiones**

La formación de NOx en la quema de gas natural es bastante inferior a la formación en diesel debido a la menor temperatura de la llama. Esto es aprovechado para mejorar el consumo de combustible mediante una sincronización en la combustión. Otra de las ventajas es el uso de un menor EGR para cumplir los límites de emisiones de NOx. Esto trae consigo un ahorro en el sistema de EGR.

La combustión de gas natural también genera una menor emisión de partículas PM que el diesel. Esto puede conducir a la eliminación de alguno de los filtros existentes en el sistema de post tratamiento, o de aumentar el EGR para no exceder las emisiones de PM.

En cambio, las emisiones de hidrocarburos no quemados y de monóxido de carbono son superiores que en un MEC, ya que el gas natural se quema más lentamente, especialmente a altas velocidades del motor y bajas condiciones de carga.

### **6.7.7 Ventajas e inconvenientes**

Las ventajas e inconvenientes del uso de motores de gas natural de inyección directa, se compararán respecto a motores diesel equivalentes, ya que ambos tipos tienen una estructura de motor similar y operan en el ciclo diesel.

Ventajas:

- 90% menos de emisiones de NOx.
- Tendencia casi nula de formación de partículas (PM).
- 20-25% menos de emisiones de CO2 debido a que prácticamente el gas natural se compone de metano, por lo tanto su ratio C/H es mucho menor.
- Sistemas de post-tratamiento de emisiones contaminantes más baratos, debido a la producción en menor cantidad de estas.
- Coste inferior del gas natural. Esto se cumplirá de forma general, en la mayoría de países del mundo, aunque variará según las reservas y las diferentes necesidades del combustible. En América del Norte y Australia el precio del gas natural es un 50% inferior al diesel.

Inconvenientes:

- Combustión incompleta debido a la menor velocidad de propagación de la llama (combustión más lenta). Esto provoca un mayor número de hidrocarburos no quemados.
- Combustible fósil, fuente agotable de energía. El aumento en el consumo de gas natural se prevé a 25.39 BBOE (BILLION BARRELS OIL EQUIVALENT) por año en el año 2030. Con estos incrementos en el consumo, el gas natural podría desaparecer en 70 años.
- Sistemas de combustibles más caros que los usados con el diesel. Esto es debido a las presiones y temperaturas soportadas en los depósitos del combustible de GNL Y GNC. Esto provoca el uso de materiales mucho más caros y con ello un proceso de fabricación mayor. También los compresores, bombas e inyectores usados con el gas natural son más caros debido a la necesidad de transportar el combustible directamente en forma gaseosa. Además la necesidad del encendido del combustible suma a estos costes el de los sistemas de encendido mencionados anteriormente.
- Densidad energética inferior: La densidad energética del GNL es de 21.4MJ/litro y la del GNC es de 8.1MJ/litro mientras que la de la gasolina es de 31.8 MJ/litro y la del diesel es de 35.6MJ/litro. Por lo tanto para viajar una misma distancia con combustible LNG se necesitará un depósito un 70% mayor que el del diesel, con las mismas características del motor en cuanto a potencia.

## 6.8 Aplicación de biocombustibles

Biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa (organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos). Estos combustibles de origen biológico pueden llegar a sustituir parte del consumo en combustibles fósiles. Cabe destacar que los biocombustibles son una alternativa más en vistas a buscar fuentes de energía sustitutivas, que sirvan de transición hacia una nueva tecnología.

Existe una amplia variedad en cuanto a combustibles de origen biológico, pero el estudio de este trabajo se centrará en los más usados y conocidos.

### **6.8.1 Biodiesel**

El biodiesel se obtiene a partir de semillas oleaginosas mediante esterificación de los aceites vírgenes extraídos principalmente de colza, girasol, palma y soja, pero también de aceites vegetales usados y de grasas animales.

La tecnología de fabricación del biodiesel a partir de aceites vegetales se encuentra bastante desarrollada, lo que implica un beneficio medioambiental importante.

El biodiesel puede emplearse como combustible único sustituyendo al diesel por completo o mezclándose con él en diferentes proporciones en los MEP o MEC. Lo más frecuente es mezclarlo con diesel, siendo la mezcla más habitual 5% biodiesel y 95% diesel.

Las propiedades físicas y químicas del biodiesel son muy similares a las del diesel, por lo que los motores convencionales no necesitan de modificaciones para poder usar mezclas de hasta un 30%, aunque muchos fabricantes de motores solo ofrecen garantías con mezclas de hasta el 5%. A partir del 30% pueden surgir problemas en el motor, como la obstrucción de inyectores.

La utilización del biodiesel puro al 100% reduciría las emisiones netas de CO<sub>2</sub> entre un 40% y un 50%.

### **6.8.2 Bioetanol**

El bioetanol se fabrica mediante la fermentación del azúcar, del almidón o de la celulosa. La elección de la materia prima depende de consideraciones técnicas y económicas.

EL bioetanol puede emplearse mezclado con gasolina en una proporción del 5% de bioetanol y 95% de gasolina, no precisándose modificación alguna del motor, y sin la pérdida de garantía del motor.

El bioetanol puede emplearse al 100% en MEP pero con ciertas modificaciones en el motor. Estas modificaciones se realizarían a fin de evitar la auto detonación del combustible en el interior del motor.

El empleo de bioetanol puro al 100% reduciría las emisiones netas de CO<sub>2</sub> sobre la base de su ciclo de vida útil entre un 50% y 60%, aunque la producción de este biocombustible genera una demanda importante de energía.

### **6.8.3 Ventajas e inconvenientes**

Ventajas:

- Proporcionan una fuente de energía reciclable, y por lo tanto, inagotable.
- Las emisiones de gases invernaderos son reducidas un 12% por la producción y combustión del etanol y un 41% por el biodiesel.
- Revitalizan las economías rurales.
- Mejoran el aprovechamiento de tierras con poco valor agrícola.
- Mejora la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.

Inconvenientes:

- Los biocombustibles producidos a base de palma aceitera, caña de azúcar y soja conllevan graves impactos sociales y medio ambientales.
- Su uso se limita a motores de bajo rendimiento y poca potencia.
- Su producción sólo es viable mediante subvenciones, por lo que los costes doblas a los de la gasolina o el diesel.
- Necesidad de grandes espacios de cultivo, ya que del total de la plantación solo se consigue un 7% de combustible.
- El combustible precisa de una transformación previa compleja.
- En los bioalcoholes, la destilación provoca, respecto a la gasolina o al gasóleo, una mayor emisión en dióxido de carbono.

# 7 CONTROL DE EMISIONES

Actualmente, el uso de combustibles fósiles para la generación de energía en los motores de combustión interna alternativos, juega un papel muy importante en la cantidad de emisiones de gases contaminantes producidos y enviados hacia la atmósfera. La generación de energía en los motores de combustión interna alternativos, produce alrededor de un 20% de las emisiones totales globales en los países más desarrollados. Esta cifra es considerable, ya que podría considerarse como una de las principales fuentes de emisiones contaminantes junto con la industria o las grandes plantas de generación de energía. Esto ha provocado un aumento en la preocupación por mejorar los sistemas de tratamientos de gases de escape, que han ido desarrollándose paralelamente a las mejoras en la eficiencia y potencia en el motor.

## 7.1 Emisiones características en un MCIA

En la combustión completa de una mezcla de combustible y oxígeno en relación estequiométrica los productos de la reacción serían únicamente vapor de agua ( $H_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Debido a la combustión incompleta que se produce en los motores por diferentes causas y a la composición de los combustibles y a la presencia de nitrógeno en el aire atmosférico, la composición de los gases de escape difiere de la correspondiente a la combustión completa, contando en su composición con algunos componentes contaminantes como son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos ( $HC$ ), el monóxido de carbono ( $CO$ ) o las cada vez más importantes partículas.

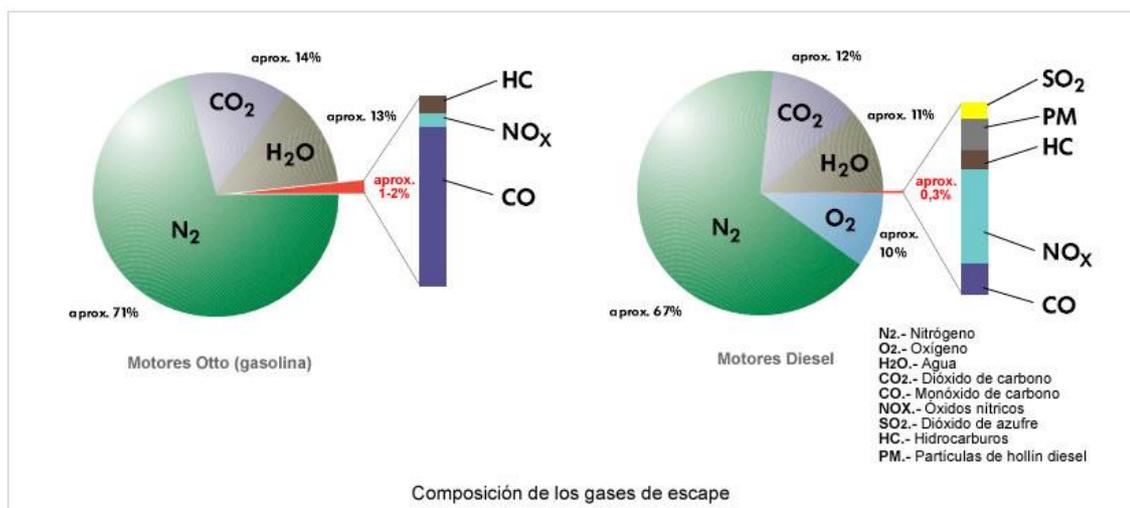


Ilustración 7-1: Principales emisiones en MEP y MEC

Los principales componentes no contaminantes de los gases de escape de un motor son los siguientes:

- Agua ( $H_2O$ ): el hidrógeno del combustible reacciona con el oxígeno del aire para dar lugar a vapor de agua que se condensará cuando se enfríe. El agua representa aproximadamente el 13% de los gases de escape.
- Dióxido de carbono ( $CO_2$ ): el carbono del combustible reacciona para formar el dióxido de carbono, que representa alrededor del 14% de los gases de escape. El  $CO_2$  es un gas inodoro, incoloro y no tóxico. No está clasificado como contaminante dentro de las emisiones de los motores, pero su papel en el efecto invernadero y el aumento de su emisión por el parque automovilista está levantando las alarmas en los expertos. Las emisiones de  $CO_2$  sólo pueden disminuirse disminuyendo el gasto de combustible.
- Nitrógeno ( $N_2$ ): el nitrógeno representa el 78% del aire que absorbe el motor, lo que se transforma en un 71% de los gases de escape, tras la poca implicación de éste en el proceso de combustión.

Los componentes contaminantes del gas de escape son debidos a la combustión incompleta y a la composición de la gasolina. Representan alrededor del 1% de los gases de escape y los principales son:

- Monóxido de carbono ( $CO$ ): es el resultado de la combustión de una mezcla rica debido a la falta de aire. También puede darse en mezclas estequiométricas o pobres globalmente, en partes de la cámara de combustión donde la mezcla local sea rica. El  $CO$  es un gas inodoro e incoloro que sustituye al oxígeno en la hemoglobina de la sangre, provocando el envenenamiento en el ser humano.
- Hidrocarburos ( $HC$ ): los hidrocarburos se producen debido a una combustión incompleta de la mezcla cuando hay falta de oxígeno o fallos en la combustión con mezclas muy pobres (*misfiring*). Algunos hidrocarburos son considerados cancerígenos por exposición a largo plazo. Los hidrocarburos parcialmente oxidados emiten un olor desagradable. Los productos químicos resultantes de la exposición al sol de estas sustancias también se consideran cancerígenos a largo plazo.
- Óxidos de nitrógeno ( $NOX$ ): esta acepción engloba todos los compuestos de oxígeno y nitrógeno. Se producen en los procesos de combustión con aire, al reaccionar el nitrógeno presente en el aire. Los principales óxidos de nitrógeno formados son: Monóxido de nitrógeno ( $NO$ ), Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y Monóxido de dinitrógeno ( $N_2O$ ).
- Dióxido de azufre ( $SO_2$ ): la formación de este compuesto se debe a la presencia de azufre en el combustible, por tanto su reducción sólo es posible mediante el control del uso que se hace del azufre en la producción de combustible. A pesar de ser un contaminante producido por los vehículos a motor no está restringida su emisión por las legislaciones anti-emisiones. Es un factor importante en la formación de la lluvia ácida. La presencia de azufre en los combustibles de los motores de combustión interna alternativos es perjudicial para los catalizadores que controlan las emisiones de los gases de escape.
- Partículas: cuando tiene lugar una combustión incompleta se da lugar a la formación de sólidos en forma de partículas, básicamente hollín. Tradicionalmente ha sido un problema de los motores diesel, hasta la aparición de los motores de inyección directa de gasolina en los que las emisiones de partículas se han convertido también en un problema.

## 7.2 Sistemas de reducción de emisiones

En este apartado se desarrollarán las principales soluciones pasivas a seguir para la disminución en la cantidad de emisiones contaminantes producidas en un MEP y en un MEC.

### 7.2.1 Sistemas empleados en MEP

- Ventilación de los gases del cárter: Su función es la de extraer los gases o los vapores del cárter para introducirlos (recircularlos) en la cámara de combustión y así puedan ser quemados. Los motores están provistos de un sistema de ventilación del cárter que tiene por objeto arrastrar fuera del mismo los vapores de agua y gasolina a medida que penetran en él, así como los procedentes de la propia descomposición del aceite, manteniendo de esta forma la presión interna. De esta manera se produce una reducción en las emisiones de HC.

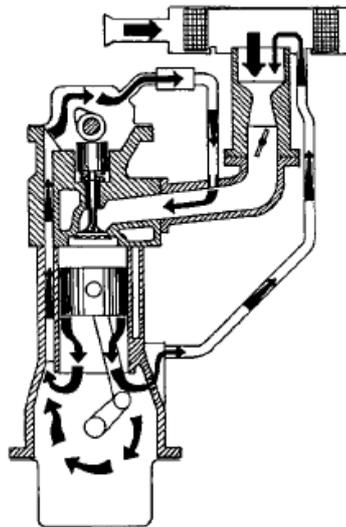


Ilustración 7-2: Proceso de ventilación de vapores del cárter

- Filtro canister: También llamado filtro de carbón activo, su objetivo es retener provisionalmente los hidrocarburos evaporados del depósito de combustible. Su purga se realiza invirtiendo la circulación del aire. Su objetivo es la reducción de HC.

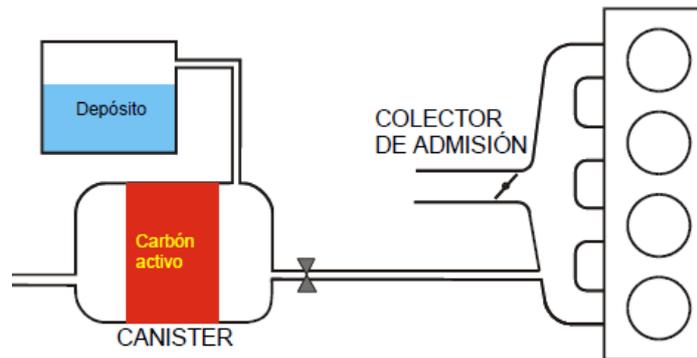


Ilustración 7-3: Filtro canister

- Catalizador de 3 vías: También llamado de "bucle cerrado", usado principalmente en los MEP de inyección indirecta. Son los más complejos, sofisticados y caros (siendo en la actualidad los más usados), y su evolución tecnológica ha desbancado a los catalizadores llamados de doble cuerpo en los que la oxidación de los gases contaminantes era incompleta. Los catalizadores de este tipo se llaman de "tres vías", porque en ellos se reducen simultáneamente los tres elementos nocivos más importantes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxido de nitrógeno (NOx). Su mayor eficacia depende de la mezcla de los gases de admisión. Para que funcionen perfectamente los catalizadores de tres vías, es preciso que la mezcla aire-gasolina tenga la adecuada composición que se acerque lo más posible a la relación estequiométrica (un kilo de gasolina por 14,7 Kg de aire).

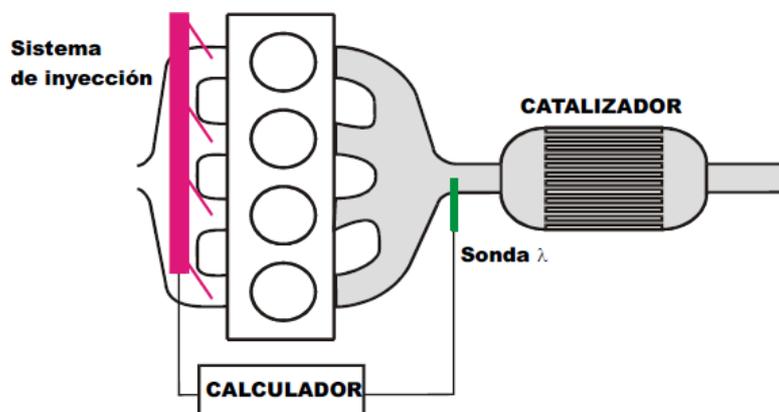


Ilustración 7-4: Esquema típico de un catalizador de tres vías

Por lo tanto, necesario un dispositivo que controle la composición de la mezcla. Este dispositivo es la "sonda lambda", que efectúa correcciones constantes sobre la mezcla inicial de aire y combustible, según el valor de cantidad de oxígeno que hay en los gases de escape antes de pasar por el catalizador.

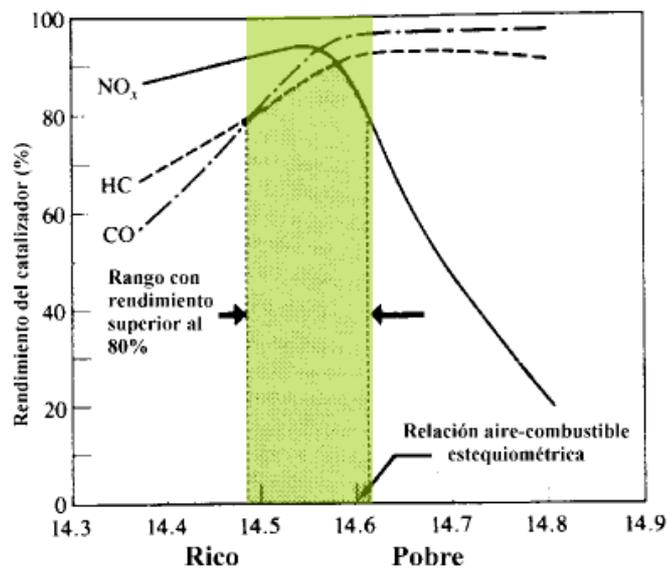


Ilustración 7-5: Rango de funcionamiento óptimo del catalizador de 3 vías

- Trampa de NOx: Hasta ahora era un gran problema el tratamiento de los gases de escape en motores con inyección directa de gasolina. Esto se debe a que con un catalizador convencional de tres vías no se pueden alcanzar los límites legales de emisiones de óxidos nítricos en los modos estratificado, pobre y homogéneo-pobre. Por ello se incorpora para estos motores un catalizador-acumulador de NOx, que almacena los óxidos de nitrógeno (NOx) en estos modos operativos. Al estar lleno el acumulador se pone en vigor un modo de regeneración, con el cual se desprenden los óxidos nítricos del catalizador-acumulador y se transforman en nitrógeno. En la inyección directa de gasolina, el oxígeno necesario para el proceso de oxidación de HC y CO no se disocia del NOx, sino que se toma de las elevadas proporciones de oxígeno residual presentes en los gases de escape. Por este motivo no es suficiente únicamente un catalizador de tres vías.

El catalizador acumulador de NOx, contiene en las capas catalíticas materiales adicionales que pueden almacenar el NOx (p.ej. el óxido bórico). Todos los recubrimientos corrientes del acumulador de NOx contienen al mismo tiempo las propiedades de un catalizador de tres vías, de forma que el catalizador acumulador de NOx trabaja para  $\lambda=1$  como un catalizador de tres vías.

La conversión de NOx en funcionamiento por mezcla estratificada pobre se lleva a cabo en tres etapas. Para el almacenamiento de NOx se oxida primero formando NO<sub>2</sub> que luego reacciona con los aditivos que hay en el recubrimiento en forma de nitratos (p.ej. nitrato de bario).

Una cantidad cada vez mayor de NOx almacenado (carga) reduce la capacidad de seguir ligando NOx. Con un estado de carga predeterminado debe regenerarse el acumulador de NOx, es decir, los óxidos de nitrógeno almacenados deben eliminarse (desacumulación) y ser convertidos. Para ello se cambia brevemente al funcionamiento por mezcla homogénea rica ( $\lambda < 0,8$ ), para reducir el NO a N sin emitir CO y HC. El final de la fase de acumulación y de desacumulación se calcula con un procedimiento modelo reforzado o se mide con un sensor NOx, o sonda lambda detrás del catalizador.

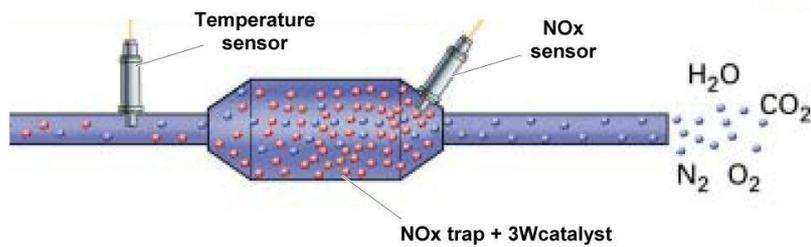


Ilustración 7-6: Trampa de NOx

## 7.2.2 Sistemas empleados en MEC

- Catalizador de oxidación: Catalizador similar a la parte de oxidación (Pt) de los catalizadores de tres vías de los MEP, situado cerca del motor para acelerar su puesta en marcha. Su objetivo principal es la oxidación de HC y CO además de tener un ligero efecto sobre la cantidad de partículas emitidas. También cabe destacar la oxidación del SO<sub>2</sub> en este tipo de catalizadores. Su uso es generalizado en todos los MEC desde el uso intensivo del EGR.
- Filtro de partículas: Conocido también por sus siglas en inglés FAP, es un dispositivo ubicado en el tubo de escape encargado de retener, en sus paredes porosas, las partículas sólidas que generan los motores sobre todo los MEC, para reducir el nivel de emisiones de estos coches. Actualmente, también se está desarrollando este tipo de filtro para los motores MEP de inyección directa, ya que su producción de partículas no es tan despreciable como se pensaba años atrás. Una vez que el filtro está lleno, él mismo se encarga de incinerarlas, mediante un proceso denominado regeneración. Para ello, cada cierto tiempo, inyecta más cantidad de combustible del habitual y así aumenta la temperatura de los gases de escape por encima de los 600 °C, para quemar las partículas. En estas fases, el consumo de combustible sube ligeramente (un 10-15%).

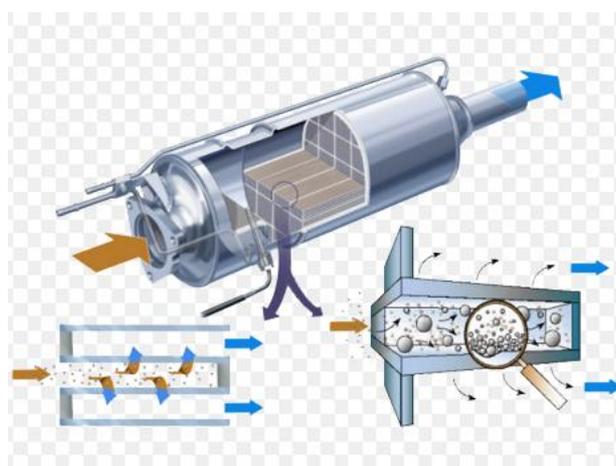


Ilustración 7-7: Esquema del filtro de partículas en un MEC

- Reducción catalítica selectiva de los NOx (SCR): Sistema de reducción de emisiones de NOx usado en la mayoría de MEC actuales, ya que su eficiencia en la reducción puede llegar hasta un 95%. Ha desbancado al sistema NSCR debido a su mayor eficiencia. Se caracteriza por la reducción de estas

emisiones por el uso de  $\text{NH}_3$ , incluso en presencia del  $\text{O}_2$ . Tiene una alta estabilidad térmica, y a diferencia de otros sistemas, no tiene penalización por regeneración, puede trabajar con menor %EGR. Su catalizador es de bajo coste, pero necesita de un aditivo conocido actualmente como AdBlue, para la generación de urea.

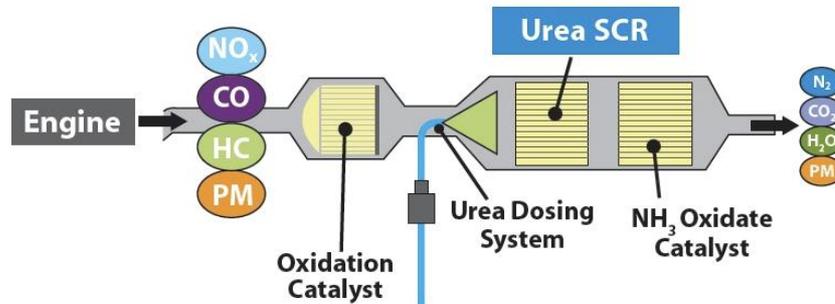


Ilustración 7-8: Esquema del funcionamiento del SCR

- Trampa de  $\text{NO}_x$ : Su principio de funcionamiento es el mismo ya comentado anteriormente en los MEP de inyección directa. Su uso en MEC se extiende en automóviles de baja potencia, combinados con un alto uso de EGR.

### 7.3 Legislación

Este proceso de regulación de las características de los automóviles nace de la preocupación por el planeta y su conservación. Gran parte de los países del mundo, tienen diferentes normativas y acuerdos, con objetivos a medio y corto plazo a cumplir, para la mejora de las condiciones del planeta. Las normativas de referencia más importantes a nivel mundial en cuanto a emisiones de gases contaminantes son:

- Normativa CARB( California Air Resources Board).
- Normativa EPA( Environmental Protection Agency, U.S.A.).
- Normativa EU (Unión Europea).
- Normativa Japonesa.

Todas estas legislaciones tienen mucho en común, tanto en procedimientos de inspección como en las restricciones, por tanto se considerará en este trabajo las normas vigentes en la Unión Europea. La legislación anti-emisiones contaminantes de la Unión Europea se basa en la directiva 70/220/CEE del año 1970 y se ha ido actualizando con directivas, que modifican a la anterior, y que se conocen como Euro 1, Euro 2..., por el momento hasta Euro 6.

Motores gasolina						
Directiva	Entrada en vigor	Masa de monóxido de carbono (CO) [g/km]	Suma de las masas de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (HC+NOx) [g/km]	Masa total de hidrocarburos (HC) [g/km]	Masa de óxidos de nitrógeno (NOx) [g/km]	Masa de partículas (PM) [g/km]
Euro 1	Julio 1992	2,72	0,97	-	-	-
Euro 2	Enero 1996	2,20	0,50	-	-	-
Euro 3	Enero 2000	2,30	-	0,20	0,15	-
Euro 4	Enero 2005	1,00	-	0,10	0,08	-
Euro 5	Septiembre 2009	1,00	-	0,10	0,06	0,005
Euro 6	Septiembre 2014	1,00	-	0,10	0,06	0,005
Motores diesel						
Euro 1	Julio 1992	2,72	0,97	-	-	0,14
Euro 2	Enero 1996	1,00	0,70	-	-	0,08
Euro 3	Enero 2000	0,64	0,56	-	0,50	0,05
Euro 4	Enero 2005	0,50	0,30	-	0,25	0,025
Euro 5	Septiembre 2009	0,50	0,23	-	0,18	0,005
Euro 6	Septiembre 2014	0,50	0,17	-	0,08	0,005

Tabla 2: Datos de las restricciones impuestas por las normativas Euro y sus fechas de entrada en vigor

# 8 EL MCIA EN EL MERCADO AUTOMOVILÍSTICO ACTUAL

---

Los motores MEC y MEP, han mostrado varias líneas de desarrollo, con el fin de mejorar la generación en el par mecánico, disminuir el consumo de combustible, las emisiones y el ruido. El desarrollo actual de ambas líneas puede decirse que está caracterizado principalmente por:

- La reducción del consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono.
- La reducción en las emisiones específicas de HC, NOx, PM y CO.
- El desarrollo de potentes sistemas post-tratamientos de los gases de escape.
- Un buen comportamiento del vehículo durante la conducción.
- Una mayor potencia específica.
- La reducción de las fricciones internas durante el funcionamiento del motor.
- Una mejora en las funciones auxiliares, minimizando el consumo de energía.
- La reducción de oscilaciones y ruido.

## 8.1 Aparición del Downsizing

La principal tendencia a seguir en los últimos años, y hasta la actualidad ha sido el conocido Downsizing, que en parte, ha provocado el resurgimiento de los motores de gasolina de inyección directa.

Los motores de combustión interna alternativos, principalmente han tenido que seguir dos caminos: la exigencia de un consumo de combustible menor, y por otro lado la reducción de emisiones contaminantes, como consecuencia de unas normativas más exigentes. La forma que han encontrado los fabricantes para evolucionar hacia estas dos ideas es ir en la dirección del Downsizing: reducir la cilindrada del motor y emplear una efectiva sobrealimentación. La idea es sencilla, si a un motor convencional le reducimos la cilindrada y lo sobrealimentamos, conseguimos mantener su potencia o incluso aumentarla, respecto al motor con más cilindrada. Como el motor es más pequeño, tiene menos pérdidas por fricción entre sus elementos, consiguiendo reducir el consumo. Además el motor es sobrealimentado, por lo que el trabajo de renovación de carga o de inyectar mezcla fresca también tiene un menor gasto energético que en un motor de aspiración natural (y se aumenta la capacidad de llenado del cilindro). Otra ventaja es el empleo de la inyección directa, no sólo en los MEC como hace unos años, sino también en los MEP, de tal manera que controlamos más la mezcla entre otras ventajas. Estas medidas, en principio, ayudan enormemente a cumplir las medidas de reducción de emisiones.

Hace unos años parecía que los MEP estaban prácticamente perdidos: los MEC consumían bastante menos y el combustible era mucho más barato. Sin embargo, el MEP ha sufrido un gran impulso: con el Downsizing ha reducido considerablemente el consumo, y su capacidad de cumplir la normativa de emisiones es en principio más sencilla. Además el precio de la gasolina y el diesel tiene una diferencia más estrecha, por lo que, si nos fijamos en el aspecto económico, es necesario hacer bastantes kilómetros para justificar la diferencia en el precio del coche diesel (sobre 20000-25000 km al año, según el ejemplo que consideremos). Además, cabe mencionar el ajuste que se está haciendo a los MEC en cuanto a emisiones, que hace que aumenten su consumo, acercándose a los de los gasolina, por culpa del post-tratamiento de gases. Como complemento, el uso de otros sistemas como el de la válvula EGR o el sistema de distribución de válvulas

variables VVT junto con el Downsizing, hacen que los motores actuales de inyección directa se complementen de forma más eficiente, consiguiendo un ahorro en combustible y emisiones, que en principio, es lo buscado por las diferentes compañías automovilísticas.

Las principales ventajas conseguidas en el uso del Downsizing son:

- Menor peso del vehículo, debido al montaje de un menor número de cilindros y a un cigüeñal más corto, por lo general disminuye el peso del motor.
- Menores pérdidas por fricción, con el consecuente ahorro de energía.
- Reducción de las pérdidas mecánicas por bombeo.
- Alta potencia específica, con menor peso del motor, que desemboca en un menor número de emisiones de CO<sub>2</sub>. Actualmente alcanza los 125CV/litro y con tendencias ascendentes.
- Menor consumo de combustible.
- Reducción general de emisiones contaminantes, con excepción de la emisión de partículas.

Los principales inconvenientes del uso del Downsizing son:

- Encarecimiento del motor, debido a que este tipo de motores incluyen sobrealimentación, sistema de válvulas variables, sistema EGR, inyección directa etc.
- Mayor complejidad del sistema en conjunto, debido a la necesidad de altas presiones internas de funcionamiento.
- Mayor número de emisiones de partículas (PM) por kilómetro.
- Mayores cargas térmicas y mecánicas, induciendo mayores posibilidades de picado en los MEP.
- Difícil equilibrado del motor y mayor ruido, debido a que la mayoría son motores tricilíndricos.

Medidas necesarias para implementar la estrategia del Downsizing:

- Incrementar presión de sobrealimentación.
- Incrementar la tasa de %EGR.
- Reducir la temperatura de admisión.
- Reducir la temperatura de funcionamiento EGR.
- Incrementar la presión máxima en el cilindro.
- Incrementar la presión máxima de inyección.

Un inicio de la aparición del Downsizing puede considerarse desde la aparición del motor EcoBoost 1.0 de Ford en el año 2012. Este motor en principio desarrollado para MEP, contaba con tres cilindros en línea , inyección directa, sobrealimentación del motor, EGR y distribución doble árbol de levas variable . Sus dos versiones iniciales desarrollaban 101CV y 125CV.



Ilustración 8-1: Motor EcoBoost 1.0 Ford 2012

A partir de aquí, en la siguiente tabla, se presentarán los principales modelos de motores de diferentes fabricantes que han aplicado downsizing en los últimos años:

Fabricante	Modelo motor	Año	Combustible Inyección Aspiración	Cilindrada (cc)	Relación de compresión	Potencia máxima
Renault	Energy 0.9 TCE	2012	Gasolina Directa Natural	898	9,5:1	90 CV @5000rpm
Grupo Volkswagen	TSI 1.0 Bluemotion	2013	Gasolina Directa Sobrealimentado	999	10,5:1	110 CV @4870rpm
	1.4 TDI Bluemotion	2014	Diesel Directa Sobrealimentado	1422	18,5:1	75 CV @3750rpm

Tabla 3: Principales modelos de motor que han aplicado downsizing (parte 1)

Fabricante	Modelo motor	Año	Combustible Inyección Aspiración	Cilindrada (cc)	Relación de compresión	Potencia máxima
Grupo PSA	1.2 turbo PureTech	2014	Gasolina Directa Sobrealimentado	1199	10,5:1	110CV @5500rpm
BMW	1.5 i	2015	Gasolina Directa Sobrealimentado	1499	10,2:1	120CV @4290rpm
	1.5d 116	2015	Diesel Directa Sobrealimentado	1496	16,5:1	120CV @3890rpm
Ford	EcoBoost 1.0	2012	Gasolina Directa Sobrealimentado	999	10:1	125CV @6000rpm
Hyundai	1.0 T-GDI 120	2015	Gasolina Directa Sobrealimentado	998	9,5:1	120CV @5000rpm
Mitsubishi	1.2 MPI	2016	Gasolina Indirecta Natural	1193	11:1	80CV @ 6000rpm
Nissan	1.2 DIG-S	2013	Gasolina Directa Sobrealimentado	1198	12:1	98CV @ 5600rpm
Opel	1.0 T EcoTec	2015	Gasolina Directa Sobrealimentado	998	10,5:1	105CV @ 5500rpm
Toyota	1.0 VVT-i	2014	Gasolina Indirecta Natural	998	11,5:1	70CV @ 6000rpm

Tabla 4: Principales modelos de motor que han aplicado downsizing (parte 2)

## 8.2 Desarrollo y futuro del HCCI / CAI

Desde el año 2005 a el año 2010, surgieron los primeros prototipos de motores que recurrieron al autoencendido controlado de la mezcla de aire y gasolina. Esta tecnología, HCCI, como ya se expuso anteriormente en el texto, tiene dos modos de funcionamiento, a altas cargas el motor funciona como un motor de gasolina normal de encendido por chispa, mientras que a bajas cargas la bujía se desactiva y el encendido de la mezcla se produce por compresión.

En el mercado actual, han sido varios los fabricantes que han investigado o siguen investigando en este campo. Destaca General Motors, como el primero en presentar un prototipo de motor de estas características en el año 2007, adaptaron motores Ecotec 2.2L para que funcionasen como HCCI a bajas cargas y los instalaron en un Opel Vectra y en un Saturn Aura.



Ilustración 8-2: Opel Vectra 2.2L HCCI

También, a final de este mismo año, Mercedes-Benz presentó en el Salón del automóvil de Frankfurt, el F-700, equipado con un motor prototipo denominado como "DiesOtto", que funciona según los principios del HCCI, además de contar con una gestión del encendido híbrida. Este prototipo podría ser la fuente de partida para futuros modelos HCCI de este fabricante. Por último el fabricante japonés Mazda, prevé lanzar para el año 2018 un motor HCCI en la ya conocida gama Skyactiv. Su primera aparición se daría en una nueva versión del Mazda 3, con el cual se espera una mejora del 30% en el ahorro de combustible sobre los motores convencionales.

## 8.3 Desarrollo y futuro del LBDI

A partir del año 2015, el fabricante de vehículos Mercedes-Benz anuncia que siete nuevas versiones de Mercedes-Benz A-,B-,E- y CLA-Class ofrecerán un mayor ahorro de combustible en comparación a modelos anteriores. Esto se debe a la aparición del motor M274 BlueDIRECT 2.0L, de 4 cilindros en línea de inyección directa de gasolina mediante espray guiado que opera en cargas homogéneas y en estratificadas pobres. El sistema de inyección alcanza hasta unos 200bar y permite realizar hasta cinco inyecciones en la misma carrera, para distribuir el combustible según el modo en el que esté operando. En este motor se estima un gasto de 5.4l/100km, un 7% menos que su predecesor.

A continuación, se presentan los diferentes modos de funcionamiento de este característico motor de

Mercedes-Benz:

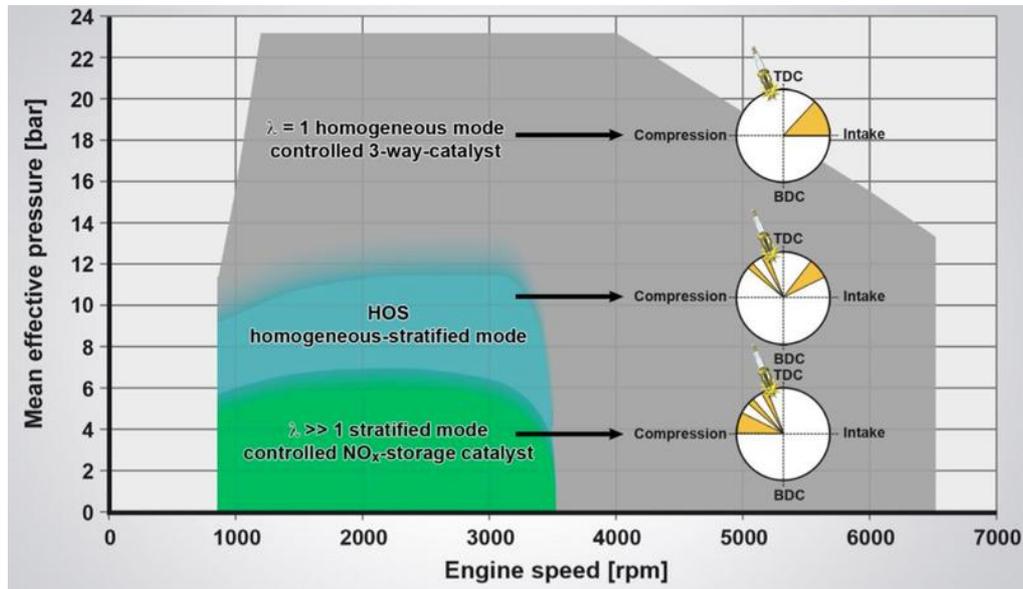


Ilustración 8-3: Modos de funcionamiento del M274 2.0L BlueDIRECT

- Modo estratificado-pobre: Abarca el mapa de características desde el modo de inactividad hasta 3500rpm y 5bar de presión media efectiva. La inyección de combustible se produce al final de la carrera de compresión y en tres etapas, de más largas a menos, para concentrar el combustible en puntos muy cercanos a la bujía de forma estequiométrica. La última inyección se realiza antes del encendido de la bujía y sirve para estabilizar las condiciones de la mezcla y la turbulencia.
- Modo estratificado-homogéneo: Empleado hasta aproximadamente 11bar de pme, donde se produce una combinación de una primera inyección al inicio de la carrera de admisión, y dos inyecciones al final de la carrera de compresión para facilitar condiciones intermedias a plena carga.
- Modo homogéneo: Se activa cuando la carga es tan alta que la mariposa se encuentra totalmente abierta. La inyección se produce al principio de la carrera de admisión, en condiciones estequiométricas.

Además de este característico sistema de combustión, este motor emplea también el sistema CAMTRONIC, que permite una distribución de válvulas variable mediante un actuador electromagnético, reduciendo así sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, y con ello un gran porcentaje del consumo de combustible.

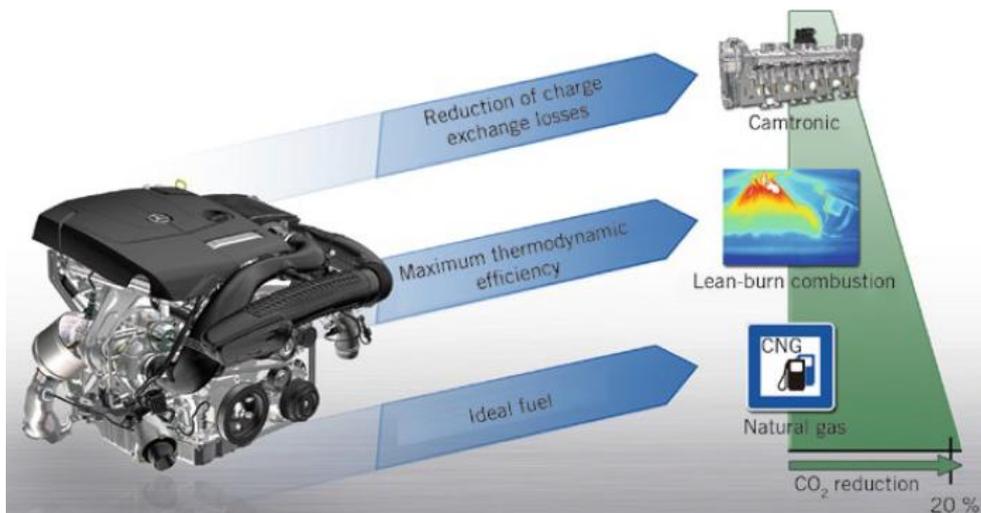


Ilustración 8-4: Aplicaciones potenciales en el motor M274 de Mercedes-Benz y su mejora en las emisiones de CO<sub>2</sub>

Por último, esta familia de motores también está desarrollada para el uso de gas natural comprimido como fuente de combustible. Es decir, se permite el uso de GNC junto con gasolina, mediante una adaptación en el sistema de la Unidad Electrónica de Control (ECU) y diversas modificaciones en el turbocompresor, pistón y sistema de inyección.

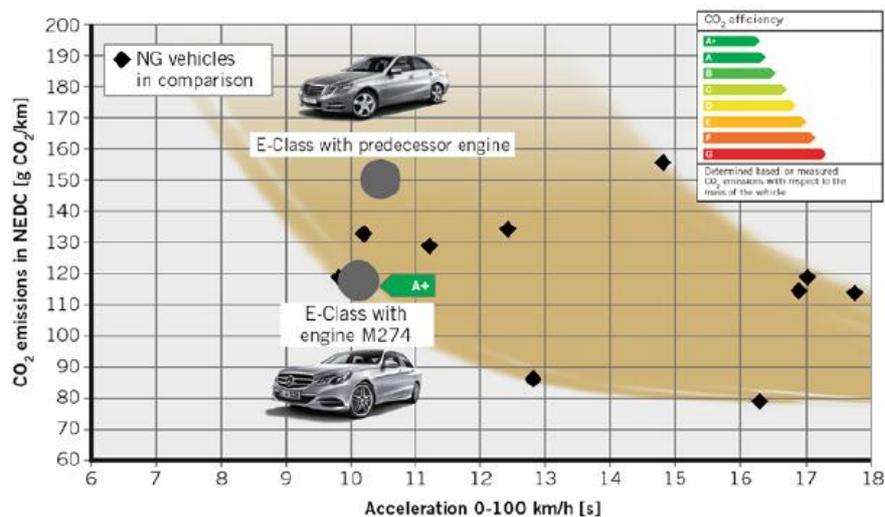


Ilustración 8-5: Comparación competitiva de rendimiento y consumo del E-Class NGD

## 8.4 El motor de gas natural en la automoción

El mayor potencial de aplicación de motores de gas natural de inyección directa se encuentra en camiones, autobuses, furgonetas y en algunos coches de uso urbano.

A día de hoy, los turismos utilizan un motor bi-fuel, es decir, puede consumir gasolina y gas natural. Los de grandes potencias, camiones, trenes o barcos son solo de gas natural. En los bi-fuel el funcionamiento del

motor es muy sencillo, el motor arranca en modo gasolina y al instante pasa a funcionar con gas natural, hasta que se agote el depósito. Una vez que este se termine, sin necesidad de parar el automóvil, el motor pasa a gasolina. En la actualidad hay 9 fabricantes de turismos y vehículos comerciales ligeros propulsados por GNC. Entre ellos están el grupo Volkswagen, el grupo Fiat, Mercedes, Volvo y Opel. Otros seis entre los que destacan Iveco, Renault o Scania ofrecen vehículos pesados urbanos, como autobuses y camiones de recogida de residuos sólidos. La tendencia es que esta oferta crezca de forma exponencial los próximos años.

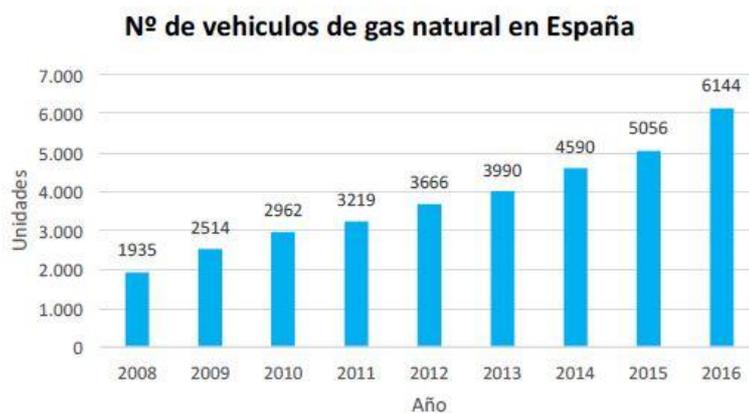


Ilustración 8-6: Número de vehículos de gas natural matriculados en España

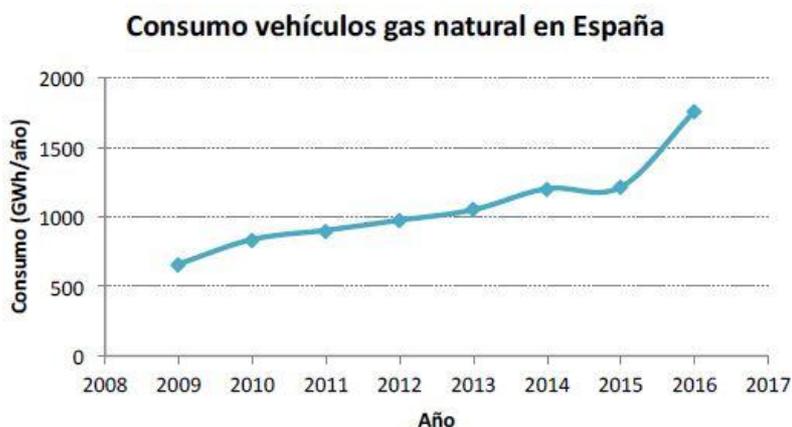


Ilustración 8-7: Consumo vehículos de gas natural en España

Como se puede apreciar en la Ilustración 8-6 y en la Ilustración 8-7, el número de vehículos de gas natural matriculados en España ha aumentado considerablemente desde el año 2008 hasta el 2016, con un aumento total de un 300%, es decir, tres veces más en este rango de ocho años. Con ello, se ha visto favorecido el consumo, mostrando así un aumento masivo en GWh/año. Cabe destacar que esta tecnología tiene un amplio margen de mejora en el futuro y se seguirá expandiendo en los próximos años, con la ampliación del número de surtidores en las diferentes ciudades.

A continuación se presentarán diferentes modelos de vehículos que trabajan con un motor propulsado con gas natural:



VOLKSWAGEN	
GOLF TGI	
CARACTERÍSTICAS	
Potencia motor	110 CV
Capacidad GNC	15 kg
Consumo de GNC	3,4 kg/100km
Capacidad gasolina	50 l
Autonomía total	1.340 km
Autonomía GNC	400 km



IVECO	
STRALIS AT440S33T/P GNL	
CARACTERÍSTICAS	
Potencia motor	330 CV
Cilindrada	7.800 cc
Par máximo	1.300 Nm
Capacidad GNL/GNC	125 kg
Cambio de marchas	MAN
Homologación	EURO VI C
MMC	40.000 kg



MAN	
LION'S CITY 313 GNC	
CARACTERÍSTICAS	
Potencia motor	310 CV
Cilindrada	12.816 cc
Par máximo	1.250 Nm
Capacidad GNC	1.460 l
Homologación	EURO VI
Caja de cambios	AUT

Ilustración 8-8: Diferentes modelos de vehículos propulsados por gas natural

# CONCLUSIONES

---

- Es posible establecer un análisis de los distintos sistemas empleados en la actualidad en un MCIA de manera estructurada y comprobar que pueden ser sistematizados.
- La amplia evolución producida en los MCIA en los últimos años, refleja la necesidad de gestionar mejor las fuentes de energía primaria así como una reducción importante en las emisiones de gases contaminante y de efecto invernadero.
- Como consecuencia de lo anterior, se ha producido un amplio desarrollo en el mercado de la inyección directa diesel, pero sobretodo en gasolina, ya que a medio plazo, parece la alternativa con más capacidad de mejora dentro de los MCIA.
- Como continuación a este trabajo, el autor sugiere un análisis de los motores híbridos y eléctricos, ya que junto con los MCIA convencionales, se podría tomar una valoración de peso de cara al futuro de estas tecnologías, es decir seleccionar aquella que sea la más eficiente y limpia.

## Artículos

- Payri, F., Luján, J., Guardiola, C., & Pla, B. (2014). A Challenging Future for the IC Engine: New Technologies and the Control Role. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 70(1), 15–30.
- Chincholkar, S. P., & Suryawanshi, J. G. (2016). Gasoline Direct Injection : An Efficient Technology. *Energy Procedia*, 90(December 2015), 666–672.
- Costa, M., Sorge, U., Merola, S., Irimescu, A., La Villetta, M., & Rocco, V. (2015). Split injection in a Homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission. *Energy*, 117, 405–415.
- Hunicz, J., & Kordos, P. (2011). An experimental study of fuel injection strategies in CAI gasoline engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(1), 243–252.
- Hunicz, J., Geca, M. S., Kordos, P., & Komsta, H. (2015). An experimental study on a boosted gasoline HCCI engine under different direct fuel injection strategies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 62, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.expthermfluisci.2015.05.008>
- Knop, V., & Mattioli, L. (2015). An analysis of limits for part load efficiency improvement with VVA devices. *Energy Conversion and Management*, 105, 1006–1016.
- Maly, R. R. (1994). State of the art and future needs in S.I. engine combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 25(1), 111–124.
- Park, C., Kim, S., Kim, H., & Moriyoshi, Y. (2012). Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine. *Energy*, 41(1), 401–407.
- Park, C., Lee, S., & Yi, U. (2016). Effects of engine operating conditions on particle emissions of lean-burn gasoline direct-injection engine. *Energy*, 115, 1148–1155.
- Sellnau, M., Foster, M., Hoyer, K., Moore, W., Sinnamon, J., & Husted, H. (2014). Development of a Gasoline Direct Injection Compression Ignition (GDCI) Engine. *SAE Int. J. Engines*, 7(2), 835–851.
- Su, J., Xu, M., Li, T., Gao, Y., & Wang, J. (2014). Combined effects of cooled EGR and a higher geometric compression ratio on thermal efficiency improvement of a downsized boosted spark-ignition direct-injection engine. *Energy Conversion and Management*, 78, 65–73.

## Libros

Payri, F., & Prof. Desantes, J., M., (ed.). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Editorial Reverté, 2011. 978-84-291-4802-2.

Zhao, Hua. *Advanced direct injection combustion engine technologies and development. Volume 1: Gasoline and gas engines*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. 978-18-456-9389-3.

Zhao, Hua. *Advanced direct injection combustion engine technologies and development. Volume 2: Diesel engines*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. 978-18-456-9744-0.

Bosch GmbH, Robert. *Gasoline engine management: Systems and components*. Germany: Springer Vieweg, 2015. 978-3-658-03963-9.

Zhao, Hua. *HCCI and CAI engines for the automotive industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007. 978-1-845-69128-8.

Bosch GmbH, Robert. *Diesel engine management: Systems and components*. Germany: Springer Vieweg, 2014. 978-3-658-03980-6.

## Sitios Web

Bunce, M. (n.d.). Efficiency and Emissions Benefits of Ultra-Lean Engine Operation as Enabled by Jet Ignition Lean Combustion : Advantages and Disadvantages. [consulta: 21 mayo 2017].

Vent, G., Enderle, C., Merdes, N., Kreitmann, F., & Weller, R. (2012). The new 2 .0l turbo engine from the Mercedes- Benz 4-cylinder engine family, 1–23. [ consulta: 3 junio 2017].

Vehículos propulsados a gas natural. Catálogo. [ consulta: 10 mayo 2017]. Disponible en: <http://gasnam.es/catalogo-vehiculos-gas-natural-gnc-gnl/>

20140207-mb @ [www.greencarcongress.com](http://www.greencarcongress.com). (n.d.). [ consulta 3 junio 2017]. Disponible en: <http://www.greencarcongress.com/2014/02/20140207-mb.html>

mercedes-benz-f-700-con-el-motor-diesotto @ [www.motorpasion.com](http://www.motorpasion.com). [ consulta 30 mayo 2017]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/mercedes/mercedes-benz-f-700-con-el-motor-diesotto>

motores-3-cilindros-gasolina-diesel-potencia-real @ [www.autopista.es](http://www.autopista.es). (n.d.). [ consulta 5 junio 2017]. Disponible en: <http://www.autopista.es/reportajes/articulo/motores-3-cilindros-gasolina-diesel-potencia-real#>

