

# **ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

## **UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

### **MEMORIA**

# **ANÁLISIS Y ESTUDIO DE SISTEMAS DE**

# **AUMENTO DE RENDIMIENTO Y**

# **REDUCCIÓN DE EMISIONES EN**

# **MOTORES ALTERNATIVOS**

# **DE COMBUSTIÓN INTERNA**

**Alumno:** Jorge Asensio López

**Directora de proyecto:** Yolanda Bravo Rodríguez

**Especialidad:** Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

**Convocatoria:** Septiembre 2012

## **ÍNDICE**

1.-OBJETIVOS/ MOTIVACIÓN/ ALCANCE.....	27
1.1.- Objetivos del proyecto.....	27
1.2.-Motivación.....	28
1.3.- Alcance.....	28
2.- INTRODUCCIÓN.....	29
3.- ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	30
3.1.- La combustión.....	30
3.1.1.- Estequiometría.....	31
3.1.2.- Motores de Encendido Provocado.....	38
3.1.3.- Motores de Encendido por Compresión.....	42
3.1.4.- La formación de los contaminantes.....	43
3.1.4.1.- Productos contaminantes en los MEC.....	44
3.1.4.2.- Métodos de reducción de emisiones contaminantes.....	45
3.2.- El petróleo	
3.2.1.- Historia del petróleo.....	49
3.2.2.-La contaminación.....	50
3.2.3.- Reservas petrolíferas.....	51
3.2.3.1.- La Teoría de Pico de Hubbert.....	57
3.2.4.- El precio del petróleo.....	59
3.3.- Normativa de reducción de emisiones contaminantes.....	61
3.3.1.- Introducción.....	61
3.3.2.- El control de las emisiones.....	61
3.3.3.- El desarrollo de medidas.....	62
3.3.3.1.- Medidas particulares.....	63
3.3.4.- Normativa de emisiones de la Unión Europea.....	64
3.3.4.1.- Normativa para turismos.....	64
3.3.4.2.- Normativa para vehículos industriales y ligeros.....	65
3.3.4.3.- Normativa para vehículos pesados(camiones y autobuses).....	66
3.3.4.4.- Normativa para vehículos N2 y N3.....	67
3.3.5.- Norma Euro6.....	68

4.- EL MACI.....	70
4.1.- Evolución histórica del MACI.....	70
4.2.- Introducción a los sistemas de aumento de rendimiento y reducción de emisiones en el MACI.....	94
4.2.1.- Optimización del sistema de inyección.....	95
4.2.1.1.- La inyección.....	95
4.2.1.1.1.- La inyección en motores de gasolina.....	96
4.2.1.1.1.1 El sistema de inyección directa.....	96
4.2.1.1.1.2.- El sistema de inyección indirecta.....	103
4.2.1.1.2.- La inyección en motores Diesel.....	105
4.2.1.1.2.1.- El inyector-bomba.....	113
4.2.1.1.2.2.- Bomba de inyección rotativa.....	114
4.4.1.1.2.3.- Sistema Common-Rail.....	118
4.2.1.1.2.4.- Bomba VP 44 Bosch.....	118
4.2.1.1.2.5.- Sistema de bomba unitaria .....	119
4.2.1.1.2.6.- Sistema de unidad inyectora.....	120
4.2.1.1.2.7.- Sistema de inyector Dual.....	121
4.2.1.1.2.8.- Sistema de inyector Dual.....	121
4.2.2.- Accionamiento flexible de válvulas.....	122
4.2.2.1.- Las válvulas en motores de combustión.....	122
4.2.2.1.1.- Introducción.....	122
4.2.2.1.2.- Lás válvulas de asiento en motores de combustión	122
4.2.2.2.- Sistemas de Distribución Variable.....	128
4.2.2.2.1.- Desplazamiento del árbol de levas.....	129
4.2.2.2.1.1.- Convertidores de fase.....	129
4.2.2.2.1.2.-Sistema Vanos.....	133
4.2.2.2.1.3.-Sistema VarioCam.....	135
4.2.2.2.1.4.-Sistema Valvetronic.....	139
4.2.2.2.1.5.- Sistema Vario Cam Plus.....	142
4.2.2.2.1.6.-Sistema VVT (cambio del Overlap).....	145
4.2.2.2.2.- Alzada de levas Variable.....	150
4.2.2.2.2.1.-Sistema VTEC de Honda.....	150
4.2.2.2.2.2.-Sistema VVTi-i de Toyota.....	153
4.2.2.2.2.3.- Sistema de desconexión selectiva de Cilindros.....	156

4.2.3.- Sistemas de admisión variable.....	164
4.2.3.1.- Introducción.....	164
4.2.3.2.- Modelos de admisión variable.....	168
4.2.3.2.1.- Admisión variable por longitud del colector.....	168
4.2.3.2.2.- Admisión variable por resonancia.....	168
4.2.3.2.3 Sistema de admisión variable por longitud del Colector.....	169
4.2.3.2.4.- Sistema de admisión variable por resonancia.....	173
4.2.3.2.5.- Sistema Dual Ram de Opel.....	174
4.2.4.- Sistema de compresión variable.....	178
4.2.4.1.- El sistema VCR.....	178
4.2.4.2.- Componentes.....	180
4.2.4.2.1.- Biela.....	180
4.2.4.2.2.- Culata.....	182
4.2.4.2.3.- Cárter.....	185
4.2.4.2.4.- Cigüeñal.....	187
4.2.4.2.5.- Cremalleras.....	189
4.2.4.2.6.- Rodillo de sincronizado.....	191
4.2.4.2.7.- Pistón de combustión.....	193
4.2.4.2.8.- Actuador.....	196
4.2.4.2.9.- Empujadores hidráulicos.....	198
4.2.4.3.-Ventajas tecnológicas.....	200
4.2.4.3.1.- Reducción de emisiones.....	200
4.2.4.3.2.- Reducción en el consumo.....	204
4.2.5.- Post-tratamiento de los gases de escape.....	206
4.2.5.1.- Las emisiones en motores alternativos de combustión Interna.....	206
4.2.5.1.1.- Componentes de los gases de escape.....	206
4.2.5.1.1.1.- Partículas sólidas.....	212
4.2.5.1.1.2.- Otros contaminantes.....	215
4.2.5.1.1.3.- Hidrocarburos in quemados.....	218
4.2.5.1.1.4.- Óxidos de azufre.....	222
4.2.5.2.- Sistemas para reducir las emisiones contaminantes de los gases de escape.....	223
4.2.5.2.1.1.-Catalizadores para sistemas inyección directa de gasolina.....	234
4.2.5.2.1.2.-Sistema SCR.....	236
4.2.5.2.1.3.-Filtro de partículas (motores Diesel).....	240
4.2.5.2.1.4.- Sistema de inyección adicional de aire en el escape.....	245
4.2.5.2.1.5.- Control de la combustión (sonda Lambda).....	251

4.2.5.2.1.6.- Sistema de ventilación positiva del cárter.....	257
4.2.5.2.1.7.- Válvula de recirculación de los gases de escape..	260
4.2.5.2.1.8.-Canister ó Filtro de carbón activo.....	279
4.2.5.2.1.9.-Sistemas de control del post-tratamiento.....	285
4.2.6. -Evolución de las técnicas de sobrealimentación.....	289
4.2.6.1.- El turbocompresor.....	291
4.2.6.2.-Compresor volumétrico.....	300
4.2.6.3.-Compresor comprex.....	302
4.2.6.4.-Sistemas biturbo.....	303
4.2.7.- Nuevos combustibles.....	311
4.2.7.1.-Regulación e impacto social de los biocombustibles.....	311
4.2.7.1.1.-Las consecuencias de la dependencia energética.	311
4.2.7.1.2.- La alternativa de los biocombustibles.....	312
4.2.7.2.- Tipos de biocombustibles.....	314
4.2.7.3.- Marco regulatorio de los biocombustibles en	
Europa.....	364
4.2.7.4.- Los biocarburantes en España.....	366
4.2.7.4.2.- El marco regulatorio en España.....	366
4.2.7.4.2.1.- Producción, logística y distribución..	368

## 5. CONCLUSIONES

## **Referencias**

- [1] Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) [www.opec.org/](http://www.opec.org/)
- [2] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OCDE  
<http://www.oecd.org/>
- [3] Agencia Internacional de Energía o AIE <http://www.iea.org/>
- [4] Aramco (Arabia Saudita), <http://www.saudiaramco.com>
- [5] National Iranian Oil Company [en.nioc.ir/](http://en.nioc.ir/)
- [6] Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima PDVSA (Venezuela) [www.pdvsa.com/](http://www.pdvsa.com/)
- [7] China National Petroleum Corporation [www.cnpc.com.cn/en/](http://www.cnpc.com.cn/en/)
- [8] Kuwait Petroleum Company [www.kpc.com.kw/](http://www.kpc.com.kw/)
- [9] Sonatrach [www.sonatrach.es/](http://www.sonatrach.es/)
- [10] Nigerian National Petroleum Corporation [www.nnpcgroup.com/](http://www.nnpcgroup.com/)
- [11] Libya National Oil Co [en.noclibya.com.ly/](http://en.noclibya.com.ly/)
- [12] Petróleos Mexicanos (PEMEX) México [www.pemex.com/](http://www.pemex.com/)
- [13] Abu Dhabi National Oil Co [www.adnoc.ae/](http://www.adnoc.ae/)
- [14] Lukoil [www.lukoil.com/](http://www.lukoil.com/)
- [15] BP [www.bp.com/](http://www.bp.com/)
- [16] Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO) [www.aspospain.org/](http://www.aspospain.org/)
- [17] ChevronTexaco [www.chevron.com/](http://www.chevron.com/) [www.texaco.es/](http://www.texaco.es/)
- [18] Repsol-YPF [www.repsol.com/](http://www.repsol.com/)
- [19] UE [europa.eu/index\\_es.htm](http://europa.eu/index_es.htm)
- [20] Protocolo de Kyoto [unfccc.int](http://unfccc.int)
- [21] Legislación CAFE de Estados Unidos

- [22] Federación Europea de Transporte y Medioambiente  
[www.transportenvironment.org/](http://www.transportenvironment.org/)
- [23] La Asociación de Fabricantes Europeos de Automóviles (ACEA) [www.acea.be/](http://www.acea.be/)
- [24] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid [www.etsii.upm.es/](http://www.etsii.upm.es/)
- [25] Mazda [www.mazda.es/](http://www.mazda.es/)
- [26] Mazda SerieRX [en.wikipedia.org/wiki/Mazda](http://en.wikipedia.org/wiki/Mazda)
- [27] Mazda MX – 5. [www.mazda.es/showroom/mx-5/overview/](http://www.mazda.es/showroom/mx-5/overview/)
- [28] Bosch [www.grupo-bosch.es/](http://www.grupo-bosch.es/)
- [29] Mercedes 300 SL del año 1954 [es.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz\\_Clase\\_SL](http://es.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Clase_SL)
- [30] Premio "Paul Pietsch Preis"
- [31] Fiat [www.fiat.es/](http://www.fiat.es/)
- [32] Toyota [www.toyota.es/](http://www.toyota.es/)
- [33] Siemens [www.siemens.com/](http://www.siemens.com/)
- [34] Delphi [delphi.com/](http://delphi.com/)
- [35] Denso [www.globaldenso.com/](http://www.globaldenso.com/)
- [36] MultiJet [www.fiatmultijet.com.ar/](http://www.fiatmultijet.com.ar/)
- [37] VP 44 bomba rotativa [www.boschservice.com.pe/productos\\_bosch](http://www.boschservice.com.pe/productos_bosch)
- [38] Bomba unitaria (UPS) [www.bosch.com.mx/content/language1/html/13449.htm](http://www.bosch.com.mx/content/language1/html/13449.htm)
- [39] Unidad inyectora UIS  
[www.bosch.com.ve/autopartes/.../sistemas.../nuevas\\_tecnologias.htm](http://www.bosch.com.ve/autopartes/.../sistemas.../nuevas_tecnologias.htm)
- [40] Nissan Motor Co [www.nissan-global.com/](http://www.nissan-global.com/)
- [41] Alfa Romeo [www.alfaromeo.es/](http://www.alfaromeo.es/)
- [42] Twin Spark [es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_Twin\\_Spark](http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Twin_Spark)
- [43] BOSCH Motronic.  
[rb-kwin.bosch.com.mx/es/.../gasolinesystems/.../motronic.html](http://rb-kwin.bosch.com.mx/es/.../gasolinesystems/.../motronic.html)

[44] Sistema Vanos

[www.bmw.es/es/es/insights/technology/.../vanos\\_double\\_vanos.html](http://www.bmw.es/es/es/insights/technology/.../vanos_double_vanos.html)

[45] BMW [www.bmw.es/](http://www.bmw.es/)

[49] Sistema VarioCam [www.porsche.com/microsite/.../default.aspx?pool...](http://www.porsche.com/microsite/.../default.aspx?pool...)

[50] Porsche [www.porsche.com/spain/](http://www.porsche.com/spain/)

[51] Porsche 968 [es.wikipedia.org/wiki/Porsche\\_968](http://es.wikipedia.org/wiki/Porsche_968)

[52] Porsche 996 Carrera [en.wikipedia.org/wiki/Porsche\\_996](http://en.wikipedia.org/wiki/Porsche_996)

[53] Audi [www.audi.es/](http://www.audi.es/)

[54] Audi A3 [www.audi.es/es/brand/es/Modelos/a3/a3.html](http://www.audi.es/es/brand/es/Modelos/a3/a3.html)

[55] Sistema Valvetronic

[www.bmw.es/es/es/insights/technology/.../mm\\_valvetronic.html](http://www.bmw.es/es/es/insights/technology/.../mm_valvetronic.html)

[56] Sistema Vario Cam Plus [www.porsche.com/microsite/.../default.aspx?pool...](http://www.porsche.com/microsite/.../default.aspx?pool...)

[57] Porsche Carrera turbo [www.porsche.com/spain/models/911/](http://www.porsche.com/spain/models/911/)

[58] Motronic ME7.8

[www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF.../Sistemas\\_de\\_Inyección.pdf...](http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF.../Sistemas_de_Inyección.pdf...)

[59] Daihatsu [www.daihatsu.com/](http://www.daihatsu.com/)

[60] Hyundai [www.hyundai.es/](http://www.hyundai.es/)

[61] Honda [www.honda.es/](http://www.honda.es/)

[62] Tecnología VTEC [es.wikipedia.org/wiki/VTEC](http://es.wikipedia.org/wiki/VTEC)

[63] VVTI-i [es.wikipedia.org/wiki/VVT-i](http://es.wikipedia.org/wiki/VVT-i)

[64] Volkswagen [www.volkswagen.es/](http://www.volkswagen.es/)

[65] AMG [www.mercedes-amg.com/](http://www.mercedes-amg.com/)

[66] Mercedes-Benz [www.mercedes-benz.es/](http://www.mercedes-benz.es/)

[67] Bentley Continental GT S [www.bentleymotors.com/](http://www.bentleymotors.com/)

[68] Seat [www.seat.es/](http://www.seat.es/)

[69] Audi S6 [www.audi.es › Home › Modelos › A6](http://www.audi.es › Home › Modelos › A6)

- [70] Audi S6 Avant [www.audi.es](http://www.audi.es) › Home › Modelos › A6
- [71] Audi S7 Sportback [motor.terra.es](http://motor.terra.es) › Autopista.es
- [72] Audi S8 [www.audi.es/AudiA8](http://www.audi.es/AudiA8)
- [73] Audi Valvelift System [www.audi.es](http://www.audi.es) › Home › Eficiencia
- [74] Citroen [www.citroen.es/](http://www.citroen.es/)
- [75] ACAV (Admisión de Características Acústicas Variables)  
[www.naikontuning.com/articulos/sistema-admision-variable/](http://www.naikontuning.com/articulos/sistema-admision-variable/)
- [76] Opel [www.opel.es/](http://www.opel.es/)
- [77] Opel Omega 3000 [es.wikipedia.org/wiki/Opel\\_Omega](http://es.wikipedia.org/wiki/Opel_Omega)
- [78] Opel Senator [en.wikipedia.org/wiki/Opel\\_Senator](http://en.wikipedia.org/wiki/Opel_Senator)
- [79] DualRam [www.naikontuning.com/articulos/sistema-admision-variable/](http://www.naikontuning.com/articulos/sistema-admision-variable/)
- [80] BMW M5 [es.wikipedia.org/wiki/BMW\\_M5](http://es.wikipedia.org/wiki/BMW_M5)
- [81] MCE-5 VCRi [www.vcr-i.com/](http://www.vcr-i.com/)
- [82] Diesel Exhaust Fluid (DEF)  
[www.cumminsfiltration.com/html/es/products/fuel/diesel.../urea.html](http://www.cumminsfiltration.com/html/es/products/fuel/diesel.../urea.html)
- [83] VW Passat [www.volksvagen.es/es/models/the\\_new\\_passat.html](http://www.volksvagen.es/es/models/the_new_passat.html)
- [84] EPA [www.epa.gov/](http://www.epa.gov/)
- [85] AdBlue [www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=2012269&contentId...](http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=2012269&contentId...)
- [86] Asociación Alemana de la Industria del Automóvil
- [87] Norma ISO 22241 [www.intertek-spain.es/documents/Adblue.pdf](http://www.intertek-spain.es/documents/Adblue.pdf)
- [88] VW Beetle [www.volksvagen.es/es/models/beetle.htmlv](http://www.volksvagen.es/es/models/beetle.htmlv)
- [89] OBD [es.wikipedia.org/wiki/OBD](http://es.wikipedia.org/wiki/OBD)
- [89] California Air Resources Board (CARB) [www.arb.ca.gov/](http://www.arb.ca.gov/)
- [90] Directiva 98/69EG [eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?)
- [91] Lancia [www.lancia.es/](http://www.lancia.es/)
- [92] Lancia Delta S4 [es.wikipedia.org/wiki/Lancia\\_Delta\\_S4](http://es.wikipedia.org/wiki/Lancia_Delta_S4)

- [93] Porsche 959 [es.wikipedia.org/wiki/Porsche\\_959](http://es.wikipedia.org/wiki/Porsche_959)
- [94] Supra Biturbo [en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Supra](http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Supra)
- [95] Motor 535d BMW [www.motorpasion.com/berlinas/prueba-bmw-535d-parte-2](http://www.motorpasion.com/berlinas/prueba-bmw-535d-parte-2)
- [96] Planta FCC  
[http://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1492-Planta-catal%EDtica-FCC-\(FCC-plant\)?p=1966](http://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/1492-Planta-catal%EDtica-FCC-(FCC-plant)?p=1966)
- [97] AEGPL ( Asociación Europea del Gas de Petróleo Licuado) [www.aegpl.eu/](http://www.aegpl.eu/)
- [98] Purvin and Gertz [www.purvingertz.com/](http://www.purvingertz.com/)
- [99] E5 [es.wikipedia.org/wiki/Gasohol](http://es.wikipedia.org/wiki/Gasohol)
- [100] E10 [es.wikipedia.org/wiki/Gasohol](http://es.wikipedia.org/wiki/Gasohol)
- [101] Vehículo de combustible flexible (FFV)  
[es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo\\_de\\_combustible\\_flexible](http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_de_combustible_flexible)
- [102] (ETBE). [en.wikipedia.org/wiki/Ethyl\\_tert-butyl\\_ether](http://en.wikipedia.org/wiki/Ethyl_tert-butyl_ether)
- [103] Norma Europea de Gasolinas EN 228  
<http://www.cne.es/cgi-bin/BRSCGI.exe?CMD=VERDOC&BASE=TODO&DOCR=1&SORT=-FECH&RNG=20&SEPARADOR=&&desc-c=+GASOLINA+SIN+PLOMO>
- [104] Directiva 2003/17/CE  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:076:0010:0019:ES:PDF>
- [105] Real Decreto R.D. 61/2006 de las especificaciones y uso de biocarburantes.  
[www.boe.es/boe/dias/2006/02/17/pdfs/A06342-06357.pdf](http://www.boe.es/boe/dias/2006/02/17/pdfs/A06342-06357.pdf)
- [106] Etanol como combustible puro (E100) [es.wikipedia.org/wiki/Gasohol](http://es.wikipedia.org/wiki/Gasohol)
- [108] Acciona-Energía [www.accionaenergia.es/](http://www.accionaenergia.es/)
- [109] Planta de Alcázar de San Juan  
[www.accionaenergia.es/media/106734/10\\_bioetanol\\_alcazar.pdf](http://www.accionaenergia.es/media/106734/10_bioetanol_alcazar.pdf)
- [110] Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA) <https://www.fega.es/v>
- [111] B5, B15, B30 o B50 [es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel](http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel)

- [112] Universidad de Bruselas, Bélgica  
[es.wikipedia.org/wiki/Universidad\\_Libre\\_de\\_Bruselas](http://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_Libre_de_Bruselas)
- [115] Boeing [www.boeing.com/](http://www.boeing.com/)
- [116] NASA [www.nasa.gov/](http://www.nasa.gov/)
- [117] National Renewable Energy Laboratory (NREL) [www.nrel.gov/](http://www.nrel.gov/) [www.nrel.gov/](http://www.nrel.gov/)
- [118] Aquatic Species Program [en.wikipedia.org/wiki/Aquatic\\_Species\\_Program](http://en.wikipedia.org/wiki/Aquatic_Species_Program)
- [119] Gaskoks, industria austriaca  
[www.slideshare.net/NahumMoreno/biomolculas-y-carbohidratos](http://www.slideshare.net/NahumMoreno/biomolculas-y-carbohidratos)
- [120] Renault [www.renault.es/](http://www.renault.es/)
- [121] ASTM (American Society for Testing and Materials) [www.astm.org/](http://www.astm.org/)
- [122] Parque nacional Tanjung Puting de Kalimantan
- [123] Norma EN 14214. [http://www.biodieselspain.com/articulos/norma\\_en\\_14214.pdf](http://www.biodieselspain.com/articulos/norma_en_14214.pdf)
- [124] CEN (Comité Europeo de Normalización) [www.cenorm.be/](http://www.cenorm.be/)
- [125] NORMA ASTM D6751 [www.astm.org/Standards/D6751.htm](http://www.astm.org/Standards/D6751.htm)
- [126] NORMA ASTM D7467 [www.astm.org/Standards/D7467.htm](http://www.astm.org/Standards/D7467.htm)
- [127] Chrysler [www.chrysler.es/](http://www.chrysler.es/)
- [128] Dodge Ram [en.wikipedia.org/wiki/Dodge\\_Ram](http://en.wikipedia.org/wiki/Dodge_Ram)
- [129] General Motors [www.gm.com/](http://www.gm.com/)
- [130] Naval Facilities Engineering Service Center  
<https://portal.navfac.navy.mil/NFESC>
- [131] Academia Rusa de Ciencias en Moscú  
[es.wikipedia.org/wiki/Academia\\_de\\_Ciencias\\_de\\_Rusia](http://es.wikipedia.org/wiki/Academia_de_Ciencias_de_Rusia)
- [132] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) [www.inta.es/](http://www.inta.es/)
- [133] General Electric [www.ge.com/es/](http://www.ge.com/es/)
- [134] British Petroleum [www.bp.com/](http://www.bp.com/)

[135] Instituto de Ahorro y Diversificación Energética (IDAE) [www.idae.es/](http://www.idae.es/)

[136] Salón Internacional del Automóvil de Madrid

[www.ifema.es/ferias/automovil/default.html](http://www.ifema.es/ferias/automovil/default.html)

[137] Proyecto gnAuto

[138] Cooperativa Valenciana de Taxistas (TAXCO) [www.taxco.es/](http://www.taxco.es/)

[139] Directiva 2003/30/CE

[http://eur-  
lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:123:0042:0042:ES:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:123:0042:0042:ES:PDF)

[140] Directiva 2003/96/CE <http://www.boe.es/doue/2003/283/L00051-00070.pdf>

[141] La Ley 34/1998, de 7 de octubre, del Sector de Hidrocarburos

<http://www.boe.es/boe/dias/1998/10/08/pdfs/A33517-33549.pdf>

[142] Artículo 6 del Real Decreto-Ley 6/2000

<http://www.boe.es/boe/dias/2000/06/24/pdfs/A22440-22458.pdf>

[143] Real Decreto 1700/2003

[http://www.biodieselspain.com/articulos/real\\_decreto\\_1700\\_2003.pdf](http://www.biodieselspain.com/articulos/real_decreto_1700_2003.pdf)

[144] Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social

[http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/l53-2002.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l53-2002.html)

[145] Artículo a la Ley de Impuestos Especiales (Ley 38/1992, de 28 de diciembre)

[http://www.minhap.gob.es/Documentacion/Publico/NormativaDoctrina/Tributaria/Impu  
estos%20especiales/Ley\\_38-1992.pdf](http://www.minhap.gob.es/Documentacion/Publico/NormativaDoctrina/Tributaria/Impuestos%20especiales/Ley_38-1992.pdf)

[146] La Directiva 2003/96/CE <http://www.boe.es/doue/2003/283/L00051-00070.pdf>

[147] Ley 22/2005 <http://www.boe.es/boe/dias/2005/11/19/pdfs/A37821-37838.pdf>

[148] Política RFTO (Renewable Fuel Transport Obligation)

<http://www.dft.gov.uk/topics/sustainable/biofuels/rtfo>

## **Bibliografía consultada**

- [www.borrmart.es](http://www.borrmart.es)
- [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/)
- [www.arpem.com](http://www.arpem.com)
- [www.ina.ac.cr](http://www.ina.ac.cr)
- [es.scribd.com](http://es.scribd.com)
- [www.taringa.net](http://www.taringa.net)
- [www.Tecmovia.com.](http://www.Tecmovia.com.)
- [wwwmascoche.net.](http://wwwmascoche.net.)
- [www6válvulas.com.](http://www6válvulas.com.)
- [www.Motorpoasión.com.](http://www.Motorpoasión.com.)
- [www.Eurocarnews.com.](http://www.Eurocarnews.com.)
- [www.tecnicadelautomovil/tallervirtual](http://www.tecnicadelautomovil/tallervirtual)
- [www.mecanicavirtual](http://www.mecanicavirtual)
- [www.tecnologiadelaautomovil](http://www.tecnologiadelaautomovil)
- [www.toyota.es/](http://www.toyota.es/)
- [www.mitsubishi-motors.es/](http://www.mitsubishi-motors.es/)
- [www.naikontuning.com](http://www.naikontuning.com)
- [www.aficionadosalamecanica.com](http://www.aficionadosalamecanica.com)
- [www.oni.escuelas.edu.ar/](http://www.oni.escuelas.edu.ar/)
- [www.honda.es/](http://www.honda.es/)
- [www.vcr-i.com](http://www.vcr-i.com)

- [www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com)
- [www.bmw.es](http://www.bmw.es)
- [www.nissan-global.com/](http://www.nissan-global.com/)
- [www.aegpl.eu](http://www.aegpl.eu)
- [www.mecanicavirtual.es](http://www.mecanicavirtual.es)
- *Sistemas de inyección Diesel: Unidad Bomba-Inyector y Unidad-Tubo-Inyector,* Libros Técnicos Bosch
- *Motores Térmicos Tomo 1.* John R. Agudelo. Universidad de Antioquia.
- Departamento de prensa Audi ( Grupo VAG).
- Tesis Doctoral , Benjamín Pla Moreno - *Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores Diesel sobrealimentados*
- *Informe sobre el marco regulatorio de los biocarburantes, con indentificación de barreras para su desarrollo en España y especial consideración de lo aspectosasociados a las actividades de logística y distribución*-Comisión Nacional de la Energía.
- “*Viabilidad de los biocombustibles: Biodiésel y Bioetanol*” – UCLM
- *Los precios del petróleo: la situación actual y perspectivas futuras* .Real Instituto Elcano.
- *Tendencias energéticas mundiales: implicaciones sociales y ambientales* .Ramón Pichs Madruga Subdirector del Centro de Investigaciones de la Economía Mundial (CIEM), La Habana, Cuba.
- *Motores de combustión interna alternativos.* Prof F. Payri , Prof. J.M. Desantes UPV

## **Lista de imágenes**

Imagen 1. Avance del frente de llama en la camara de combustión en MEP.....	39
Imagen 2. Procesos en MEP.....	41
Imagen 3. Esquema de la estructura de la llama Diesel en la fase cuasiestática de.....	45
la fase de combustión por difusión.	
Imagen 4. Reservas petrolíferas y de gas mundiales.....	56
Imagen 5. Eolípila o primera turbina de reacción pura que se conoce en la historia. Siglo I a.C.....	71
Imagen 6. El motor de Huygens.....	72
Imagen 7. Esquema del motor de Savery.....	73
Imagen 8. Esquema de la máquina de vapor de Thomas Newcomen.....	74
Imagen 9. Esquema de la máquina de vapor de James Watt.....	76
Imagen 10. Máquina de vapor ubicada como pieza de museo en la ETSII de Madrid...	77
Imagen 11. Esquema del motor Stirling y funcionamiento básico del motor.....	78
Imagen 12. Motor de Street (1794).....	80
Imagen 13. Vista parcial del motor de pistón libre de Barsanti y Matteucci.....	81
Imagen 14. Diagrama presión – volumen del motor de Lenoir.....	82
Imagen 15. Esquema del motor de Brayton y representación en el P – V del proceso ideal.....	83
Imagen 16. Nikolaus August Otto y principio de operación del motor de gas de Otto.	84
Imagen 17. Motor de dos tiempos de Clerk (1878).....	85
Imagen 18. Rudolf Diesel (1892).....	89
Imagen 19. Primer motor operativo de Diesel y taller en Augsburg, donde R. Diesel realizaba sus experimentos.....	90

Imagen 20 . Planta de generación eléctrica empleando motores Diesel. Kiev (Rusia) 1904.....	90
Imagen 21. Motor Wankel [Heywood, 1988].....	92
Imagen 22. Principio de funcionamiento del motor Wankel [Heywood, 1988].....	93
Imagen 23. Inyección directa.....	97
Imagen 24. Sistema de inyección directa de gasolina.....	103
Imagen 25. Inyección indirecta y directa.....	104
Imagen 26. Inyector-bomba.....	106
Imagen 27 Evolución histórica de los inyectores bomba Bosch.....	107
Imagen 28. Sistema de inyección.....	107
Imagen 29. Sistema de inyección 2.....	108
Imagen 30. Sistema de generación de alta presión de inyección.....	109
Imagen 31. Inyector.....	110
Imagen 32. Funcionamiento de sistema inyector de alta presión.....	110
Imagen 33. Electroválvula de alta presión.....	112
Imagen 34. Esquema de la inyección con válvula rotativa.....	113
Imagen 35. Sistema Common Rail de Bosch.....	115
Imagen 36. Esquema de instalación del sistema Common Rail.....	116
Imagen 37. Bomba VP 44 Bosch.....	119
Imagen 38. Sistema de bomba unitaria.....	120
Imagen 39. Sistema de unidad inyectora.....	120
Imagen 40. Inyección Dual frente inyección estándar.....	121
Imagen 41. Sistema de inyección Dual.....	121
Imagen 42. Esquema entrada- salida de gases en cámara de combustión.....	123
Imagen 43. Ejemplo de diagrama de distribución.....	127
Imagen 44. Cruce de válvulas.....	128

Imagen 45. Motor Alfa Romeo con variador de fase.....	130
Imagen 46. Convertidor de fase.....	131
Imagen 47. Esquema de un convertidor de fase.....	132
Imagen 48. Esquema de un sistema VANOS de BMW.....	133
Imagen 49. Esquema de funcionamiento de un sistema BI-VANOS de BMW.....	134
Imagen 50. Curvas de apertura de válvulas en sistema BI-VANOS de BMW.....	135
Imagen 51. Sistema VarioCam.....	136
Imagen 52. Diagrama de distribución de un sistema VarioCam.....	137
Imagen 53. Funcionamiento del variador de fase.....	138
Imagen 54. Funcionamiento variador de fase.....	138
Imagen 55. Sistema Valvetronic.....	140
Imagen 56. Alzada variable mediante regulación electrónica continua.....	140
Imagen 57. Variación alzada de válvulas con el sistema Valvetronic.....	141
Imagen 58. Sistema Valvetronic en motor.....	141
Imagen 59. Funcionamiento sistema Vario Cam Plus.....	142
Imagen 60. Sistema Vario Cam Plus en motor Boxter.....	144
Imagen 61. Lecturas captadas en el sistema VVT y mandadas a Unidad de Control...	147
Imagen 62. Sistema VVT.....	148
Imagen 63. Avance en sistema VVT.....	148
Imagen 64. Retardo en sistema VVT.....	149
Imagen 65. Retención en sistema VVT.....	149
Imagen 66. Motor Honda con tecnología VTEC.....	150
Imagen 67. Funcionamiento sistema VTEC.....	152
Imagen 68. Funcionamiento a bajas y medias revoluciones sistema VVTi-i.....	153

Imagen 69. Funcionamiento a altas revoluciones.....	154
Imagen 70. Sistema hidráulico de control y variación de parámetros en función de los revoluciones en sistema VVTi-i.....	155
Imagen 71. Motor 4.0 TFSI V8 de Audi.....	156
Imagen 72. Despiece del mismo motor con el Sistema de Desconexión a la vista.....	157
Imagen 73. Funcionamiento del Audi Valvelift System.....	159
Imagen 74. Sistema Valve Lift en bloque motor.....	160
Imagen 75. Desplazamiento pieza flotante con perfiles de levas en función de los regímenes del motor.....	161
Imagen 76. Desplazamiento axial de la pieza flotante cambiando el perfil de leva en contacto.....	161
Imagen 77. Eje ranurado sobre el que se coloca la pieza flotante.....	162
Imagen 78. Pieza flotante encajada axialmente con el eje.....	162
Imagen 79. Muelle interno en el eje ranurado, para asegurar la correcta colocación.....	162
Imagen 80. Inyección monopunto y multipunto.....	165
Imagen 81. Sistema de aspiración ajustable en continuo.....	165
Imagen 82. Sistema de admisión ajustable BMW.....	166
Imagen 83. Estructura de los conductos de admisión.....	167
Imagen 84. Estructura de una admisión resonante.....	168
Imagen 85. Funcionamiento de sistema de aspiración variable Toyota.....	170
Imagen 86. Sección transversal y longitudinal de motor V6 Mercedes con admisión variable.....	170
Imagen 87. Flujo del aire en sistema de admisión variable.....	171
Imagen 88. Funcionamiento colector de admisión variable.....	172
Imagen 89. Funcionamiento de la admisión variable resonante.....	173
Imagen 90. Funcionamiento sistema Dual Ram Opel por encima y debajo de las 4000 rpm.....	174
Imagen 91. Esquema de funcionamiento de la admisión en BMW M5.....	175

Imagen 92. Motor M5 BMW de 6 cilindros.....	176
Imagen 93. Esquema del sistema de aspiración variable resonante del BMW M5.....	177
Imagen 94. Relación de volúmenes.....	178
Imagen 95. Esquema del sistema VCR.....	180
Imagen 96. Biela del sistema VCR.....	181
Imagen 97. Estado tensional de la biela del sistema VCR en funcionamiento.....	181
Imagen 98. Corte de la culata.....	183
Imagen 99. Junta de la culata del sistema sistema VCR.....	183
Imagen 100. Bloque motor sistema VCR.....	184
Imagen 101. Cárter sistema VCR.....	185
Imagen 102. Estado tensional del bloque motor.....	186
Imagen 103. Diseño del cigüeñal del sistema VCR.....	187
Imagen 104. Cigüeñal del sistema VCR sin contrapesos de equilibrado.....	187
Imagen 105. Estado tensional del cigüeñal.....	188
Imagen 106. Estado tensional de la cremallera del pistón en sistema VCR.....	189
Imagen 107. Diseño de la cremallera del pistón.....	190
Imagen 108. Rodillo de sincronizado en el sistema VCR.....	191
Imagen 109. Rodillo de sincronizado.....	193
Imagen 110. Pistón de combustión sistema VCR.....	193
Imagen 111. Despiece del pistón de combustión junto con la cremallera.....	193
Imagen 112. Estado térmico del pistón en funcionamiento.....	194
Imagen 113. Ventajas del diseño del pistón de combustión del sistema VCR.....	195
Imagen 114. Esquema del cilindro actuador.....	196
Imagen 115. Regulación de la relación de compresión.....	197
Imagen 116. Localización de los empujadores hidráulicos.....	199
Imagen 117. Empujador hidráulico en el corte del bloque motor.....	199

Imagen 118. Tasas impuestas al motor con sistema VCR por emisiones de CO2 en Francia.....	201
Imagen 119. Filtro de partículas con adición de AdBlue y reducción catalítica.....	203
Imagen 120. Catalizador de 3 vías .....	203
Imagen 121. Comparativa de emisiones en función del tamaño del tipo de vehículo..	205
Imagen 122. Efecto del CO2 en la sangre.....	217
Imagen 123. Efecto del smog fotoquímico en las grandes ciudades.....	221
Imagen 124. Elementos contaminantes generados en el vehículo por lugar de origen.	224
Imagen 124. Localización del catalizador.....	225
Imagen 125. Estructura catalizador de 3 vías.....	226
Imagen 126. Catalizador por oxidación.....	227
Imagen 127. Estructura interna de un catalizador oxidación.....	227
Imagen 128. Esquema de catalizador con toma intermedia de aire.....	228
Imagen 129. Catalizador de 3 vías.....	229
Imagen 130. Esquema de los procesos en un catalizador de 3 vías.....	230
Imagen 131. Esquema interno de un catalizador de 3 vías.....	231
Imagen 132. Situación del catalizador en la línea de escape.....	233
Imagen 133. Procesos de la línea de escape con catalizadores.....	234
Imagen 134. Sistema SCR.....	236
Imagen 135. Filtro de partículas Diesel.....	240
Imagen 136. Esquema de una partícula de hollín.....	241
Imagen 137. Transformación química de compuestos.....	242
Imagen 138. Línea de escape con post-tratamiento.....	242
Imagen 139. Regulación de línea de escape con Post-tratamiento.....	243
Imagen 140. Sistema con aditivo.....	244

Imagen 140. Filtro con aditivo.....	244
Imagen 141. Filtro sin aditivo.....	244
Imagen 142. Válvulas Pulsair.....	245
Imagen 143. Válvula pulsair abierta y cerrada.....	245
Imagen 144. Funcionamiento válvula Pulsair.....	247
Imagen 145. Esquema de un sistema con inyección del aire en el escape.....	248
Imagen 146. Esquema del sistema de inyección de aire en el escape Motronic.....	248
Imagen 147. Esquema del sistema de inyección de aire en el escape.....	249
Imagen 148. Esquema de los componentes de un sistema de inyección de aire en el escape.....	250
Imagen 149. Sonda Lambda Bosch.....	251
Imagen 150. Localización de la sonda Lambda.....	252
Imagen 151. Funcionamiento de la sonda en bucle cerrado.....	254
Imagen 152. Línea de escape con dos sondas lambda.....	255
Imagen 153. Catalizador con dos sondas lambda.....	255
Imagen 154. Señales de las sondas lambda.....	256
Imagen 155. Línea de escape de un motor FSI de VAG.....	257
Imagen 156. Sistema de ventilación abierta.....	258
Imagen 157. Sistema de ventilación cerrada.....	259
Imagen 158. Sistema PCV.....	259
Imagen 159. Esquema del circuito de ventilación positiva.....	260
Imagen 160. Esquema de un sistema EGR.....	263
Imagen 161. Sección de una válvula EGR neumática.....	270
Imagen 162. Sección de una válvula EGR eléctrica.....	271
Imagen 163. Funcionamiento de una válvula EGR.....	272
Imagen 164. Válvula EGR eléctrica desarrollada por Delphi Automotive.....	272

Imagen 165. Tipos de válvulas EGR Diesel.....	273
Imagen 166. Tipos de válvulas EGR para motores gasolina.....	273
Imagen 167. Esquema de gestión de la gestión electrónica de un Diesel donde se puede observar la función del EGR.....	274
Imagen 168. Esquema de la recirculación de gases de escape.....	275
Imagen 169. Esquema de un sistema EGR con refrigeración de los gases de escape.....	276
Imagen 170. Sistema de refrigeración de un motor TDI donde se puede observar la parte perteneciente a la refrigeración del EGR.....	277
Imagen 171. Carbonilla acumulada en la válvula EGR.....	278
Imagen 172. Representación de la evaporación de los gases de hidrocarburos en un vehículo antiguo.....	280
Imagen 173. Esquema interno del canister.....	280
Imagen 174. Esquema de funcionamiento del canister.....	282
Imagen 175. Localización del canister en el vehículo.....	283
Imagen 176. Circuito de control del canister.....	283
Imagen 177. Canister en un sistema de inyección electrónica Motronic de Bosch.....	284
Imagen 178. Turbocompresor (A) y compresor volumétrico (B).....	290
Imagen 179. Funcionamiento de un turbocompresor (izda).....	291
Imagen 180. Estructura del turbocompresor.....	291
Imagen 181. Regulación de la presión de control.....	294
Imagen 182. Turbocompresor de geometría variable.....	296
Imagen 183. Turbocompresor en regímenes bajos.....	297
Imagen 184 . Turbocompresor a regímenes altos.....	298
Imagen 185 .Estados de funcionamiento de la electrovalvula para regulacion de la presion de sobrealimentacion.....	299
Imagen 186 .Compresor volúmetrico tipo roots.....	300
Imagen 187. Funcionamiento de compresor tipo roots.....	301
Imagen 188. Estructura del Turbo Comprex.....	302

Imagen 189 . Compresor tipo Comprex.....	303
Imagen 190 .Sistema biturbo.....	304
Imagen191. Motor 1.4 TSI de VW.....	306
Imagen 192. Accionamiento del compresor.....	308
Imagen 193. Compresor motor V6 motor TFSI de Audi.....	309
Imagen 194. Logística y distribución del GLP.....	321
Imagen 195. Estaciones de llenado en 2007.....	322
Imagen 196. Esquema de la fabricación del bioetanol.....	328
Imagen 197. Diferencias en los procesos de obtención de bioetanol.....	330
Imagen 198. Distribución del bioetanol.....	334
Imagen 199. El bioetanol en España.....	335
Imagen 200. El BioDiésel en España.....	351
Imagen 201. Pilas de combustible.....	359
Imagen 202. Abastecimiento de GNV.....	364
Imagen 203. Consumo de biocarburantes en Europa en 2007.....	373

## **Lista de tablas**

Tabla 1. Reservas y producción anual de hidrocarburos a nivel mundial.....	56
Tabla 2. Normas europeas sobre emisiones para turismos (categoría M1*), en g/km...	64
Tabla 3. Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros ≤ a 1305 kg (categoría N1 - I), en g/km.....	65
Tabla 4. Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros 1305 kg-1760 kg (categoría N1 - II), en g/km.....	65
Tabla 5. Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros 1760-3500 kg (categoría N1 - III), en g/km.....	66
Tabla 6. Normas europeas sobre emisiones para motores diésel HD, en g/kWh (Humo en m-1).....	67
Tabla 7. Normas europeas sobre emisiones para la categoría EDC.....	67
Tabla 8. Normas europeas sobre emisiones para el ciclo(antiguo) ECE R49.....	67
Tabla 9. Características técnicas de la biela del sistema VCR.....	182
Tabla 10. Características técnicas de la culata.....	184
Tabla 11. Diferenciación entre el cárter de aluminio y de fundición.....	186
Tabla 12. Características técnicas de cigüeñal.....	188
Tabla 13. Características técnicas tanto de la cremallera anexa al pistón, cómo del engranaje.....	190
Tabla 14. Características técnicas del rodillo de sincronizado.....	192
Tabla 15. Características técnicas del pistón de combustión.....	194
Tabla 16. Características técnicas del cilindro actuador.....	198
Tabla 17. Características técnicas del empujador hidráulico.....	200
Tabla 18. Normativas Euro de emisiones.....	202

Tabla 19. Influencia de la reducción de determinados parámetros y los resultados en consumo y reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	204
Tabla 20. Ahorro con implementación del sistema VCR.....	205
Tabla 21. Valores límite de Euro 6.....	223
Tabla 22. Ventajas e inconvenientes del uso del turbocompresor.....	295
Tabla 23. Ventajas de los turbos de geometría variable.....	299
Tabla 24. Ventajas e inconvenientes del compresor volumétrico.....	301
Tabla 25. Ventajas e inconvenientes del turbo Comprex.....	302
Tabla 26. Comparativa de combustibles.....	324
Tabla 27. Rendimiento de los cultivos de producción de BioDiésel.....	345
Tabla 28. Estándares según norma ASTM D6751.....	348
Tabla 29. Estándares según norma ASTM D7467.....	349
Tabla 30. Análisis del uso de GNV .....	361

## **Lista de gráficas**

Gráfica 1. Proporción de mezcla y sus efectos en la emisión de gases contaminantes.....	34
Gráfica 2. Relación entre lambda y el porcentaje de CO y CO <sub>2</sub> .....	35
Gráfica 3. Relación entre lambda y la emisión de partículas de HC.....	36
Gráfica 4. Resumen de relación de lambda y emisiones.....	37
Gráfica 5. Ventana Lambda.....	38
Gráfica 6. Mapa dosado-temperatura de formación de NOx y hollín.....	46
Gráfica 7. Consumo de energía primaria global.....	48
Gráfica 8. Teoría del Pico de Hubbert.....	58
Gráfica 9. Par motor del BMW M5 en función de las revoluciones.....	175
Gráfica 10. Composición de los gases de escape.....	207
Gráfica 11. Formación del NO en función de la temperatura pico y dosado.....	209
Gráfica 12. Formación de NOx y HC en función de la cantidad de aire y la temperatura de entrada del aire de admisión.....	209
Gráfica 13. Velocidad de formación del NOx en función de la temperatura de entrada y dosado.....	210
Gráfica 14. Emisión de NOx en función de la temperatura de entrada al motor.....	211
Gráfica 15. Evolución de la temperatura pico de combustión función de los grados de cigüeñal.....	212
Gráfica 16. Formación del CO.....	216
Gráfica 17. Contaminantes en función del dosado.....	219
Gráfica 18. Formación en función del ángulo del cigüeñal.....	220
Gráfica 19. Formación de óxidos de azufre en función del contenido de azufre del combustible.....	222
Gráfica 20. Relación entre la mezcla de combustible, el ratio de conversión de contaminantes del catalizador y el voltaje de la sonda.....	253
Gráfica 21. Comparativas de sistemas EGR con legislación EURO III y EURO IV.....	261

Gráfica 22 . Fases de trabajo de un sistema biturbo.....	305
Gráfica 23. Emisiones de Nox en función del combustible.....	318
Gráfica 24. Emisiones de partículas en función del combustible.....	318
Gráfica 25. Estimaciones de consumo mundial de GLP.....	319
Gráfica 26. Producción en millones de toneladas de GLP.....	320
Gráfica 27. Suministro en millones de toneladas de GLP en función de regiones....	320

# **1. OBJETIVOS/ MOTIVACIÓN/ ALCANCE**

## **1.1- Objetivos**

El objetivo de este proyecto surge como la necesidad de análisis de los sistemas actuales y futuros implementados en motores alternativos de combustión interna, para el aumento de su rendimiento, abarcando por tanto la obtención de mayores prestaciones con una reducción en el consumo y por otro lado el compromiso social, tecnológico y medioambiental de reducir las emisiones nocivas de estos.

Es obvio que las modificaciones tecnológicas nacen como respuesta a unas necesidades e inquietudes, fuertemente dependientes y condicionadas por la situación histórica y el entorno social e industrial en el que se desarrollan.

El desarrollo actual y futuro de los motores alternativos de combustión interna se va a ver influido por un momento histórico en el que, a nivel industrial se busca la máxima eficiencia, en un mundo competitivo, en el que el cuidado del medio ambiente se ha vuelto una de las principales metas. Es por tanto de obligado cumplimiento el trabajar tratando de, en un sector cambiante y exigente como es la industria de la automoción, conseguir desarrollar continuamente mejoras que incorporándose al MACI, mejoren y optimicen los procesos internos y externos, que son la seña de identidad de estos motores.

De modo que en este estudio, se ha tratado de analizar las líneas presentes y futuras que rodean a los motores de combustión, tratando de mostrar la situación tecnológica actual y futura del MACI, en un momento social, en el que los precios de los carburantes y el cuidado del medio ambiente se han vuelto fuertes condicionantes, que generan el que, en ocasiones el histórico motor de combustión se ve sometido a examen.

## **1.2-Motivación**

La elección personal de análisis del MACI, de sus sistemas y sus futuras alternativas, surge debido a la inquietud propia generada en un momento en el que el cuidado por el entorno se ha vuelto más que una posibilidad una necesidad, y por la plena convicción de que todo está expuesto a mejora.

Es por ello que socialmente las necesidades cambian, y la tecnología que está al servicio de la sociedad debe hacerlo también.

Esta necesidad de progreso, ligada como anteriormente se ha comentado a los altos precios del combustible y al cuidado del medio ambiente, ha propiciado a poner en duda al tradicional e histórico motor de combustión.

Por tanto he considerado adecuado por un lado analizar la situación actual y las líneas futuras del motor de combustión interna, evidenciando las posibles mejoras viables, a corto o largo plazo.

Finalmente, se ha buscado, a nivel personal, respaldar esa necesidad de conocimiento, de investigación y por otro lado, como futuro técnico, de análisis crítico de la información, para obtener conclusiones lógicas y fundadas.

## **1.3- Alcance**

El alcance del proyecto tiene como base el análisis del entorno actual a nivel tanto energético como mediambiental, centrándonos en los distintos sistemas de mejora implementados en el MACI, desarrollados para aumentar su eficiencia y reducir las emisiones contaminantes generados por estos.

## **2. Introducción**

El estudio que se ha realizado abarca de inicio el análisis de la problemática actual tanto energética como medioambiental, pasando por el proceso de la combustión.

Posteriormente se entrará en materia legislativa, para exponer las medidas tomadas a nivel nacional, europeo e internacional en torno a los motores de combustión, las normativas de reducción de emisiones y los planes de acción para el fomento de vehículos de cero emisiones.

Todo ello generará el marco de desarrollo de los diferentes sistemas incorporados al motor alternativo de combustión y sus componentes, que analizaremos, estudiando por tanto la optimización de los procesos que intervienen desde la inyección, al escape.

Por otro lado, y puesto que el avance tecnológico en esta materia, potencia y busca cómo fin último la reducción de emisiones, se estudiarán las múltiples variantes de biocombustibles o combustibles alternativos que existen en la actualidad.

Finalizaremos el proyecto con un análisis consecuente al estudio realizado, tratando de, tras una reflexión fundada, marcar las posibles líneas de actuación que desde el punto de vista personal se considerarían interesantes.

## **3.Análisis de la situación actual**

### **3.1.- La combustión**

Es importante, antes de empezar destacar que la combustión es un proceso complejo, y muy completo, que requeriría un amplio análisis, que en este caso no es el objetivo. En este apartado se mencionan los procesos fundamentales que ayudan a la comprensión básica del fenómeno, cómo se produce, que procesos químicos y físicos intervienen y como ello condiciona la formación de contaminantes, que por consiguiente respaldarán la creación de sistemas y medidas para reducirlos.

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cuál generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz.

En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente oxígeno en forma de O<sub>2</sub> gaseoso.

Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. En una reacción completa todos los elementos tienen el mayor estado de oxidación. Los productos que se forman son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el agua, el dióxido de azufre ( SO<sub>2</sub>) ( si el combustible contiene azufre) y pueden aparecer óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) dependiendo de la temperatura y la cantidad de oxígeno de la reacción.

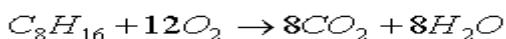
En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada.

Por ello para entender el proceso de combustión, es necesario conocer un concepto básico, la estequiometría, es decir, de la cantidad de oxígeno, o en su caso aire, que hace falta para quemar una cierta masa de combustible. También nos introduciremos un poco en el proceso, estudiando las diversas etapas que tienen lugar, como reacciones parciales de la combustión completa. Aquí se hablará también de los productos que quedan al final de la reacción, en función del aire que mezclamos con el combustible.

### 3.1.1.- Estequiométría

La estequiometría es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactantes (oxígeno y combustible) y los productos de la combustión. El balance de estas reacciones depende únicamente de la conservación de la masa de cada una de las especies químicas que intervienen en la reacción.

La reacción de combustión de una molécula de combustible requiere de varias moléculas de oxígeno, en función del número de carbonos e hidrógenos de que esté compuesta. Cada dos hidrógenos que haya en el combustible, requieren un átomo de oxígeno, para formar una molécula de agua; y cada carbono requiere dos átomos de oxígeno, para formar una molécula de dióxido de carbono. Con esa forma, se obtiene una combustión completa. Para el caso del octeno, por ejemplo, de molécula C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>, la reacción de combustión completa es:

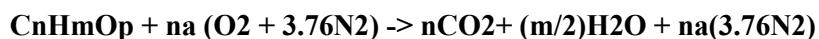


Hablando en términos de moles, la masa molecular del octeno es, más o menos, 112 g/mol, y la de oxígeno 32 g/mol, luego se necesitan 384 g de oxígeno para quemar 112 g de octeno. Como el aire tiene, más o menos, un 21% de moléculas de oxígeno y un 79% de nitrógeno, las 12 moléculas de oxígeno van acompañadas de 45.1 moléculas de nitrógeno, así que en definitiva, para quemar los 112 g de octeno, hacen falta 1648 g de aire (384 g de oxígeno y 1264 de nitrógeno).

Se llama  $\lambda$  (lambda, en este caso) al cociente entre la masa de aire y la masa de combustible de una mezcla. Se dice que la mezcla es estequiométrica cuando contamos justo con el aire necesario para quemar el combustible que hay. Se llama lambda relativa ( $\lambda_r$ ) al cociente entre la lambda y la lambda estequiométrica, luego una  $\lambda_r$  mayor que 1 indica que la mezcla es pobre, con exceso de aire, y si es menor que uno, que la mezcla es rica, con exceso de combustible.

Como ejemplo, en un Otto de inyección en colector, la  $\lambda_r$  de funcionamiento normal es de 1, pero a plena carga, cuando pisamos el acelerador al máximo, pasa a ser de unos 0,87. Para tener máximo rendimiento, o mínimo consumo,  $\lambda_r$  ha de ser aproximadamente 1,15.

La ecuación que define la proporción exacta entre el aire y el combustible que es necesario teóricamente, para que todo el combustible se oxide hasta los productos finales de combustión y teniendo en cuenta que actualmente muchos combustibles de los utilizados en los MACI contienen oxígeno se puede expresar como:



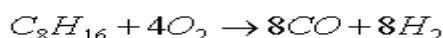
donde  $na = (n + m/4 - p/2)$  siendo el número de moles para oxidar completamente el combustible.

Con n moles y m masa

Con n, m y p subíndices.

Es necesario comentar que las ecuaciones expuestas arriba corresponden a una combustión perfecta, en particular, la primera, es una reacción global, es decir, muestra el inicio y el final de una combustión perfecta, sin embargo, las reacciones no siempre se cumplen en su totalidad, y tampoco son instantáneas, sino que constan de varias reacciones intermedias que ayudan a completar el proceso.

Se pueden dar dos reacciones intermedias, que de alguna forma son etapas del proceso. La primera consiste en la destrucción de la molécula de hidrocarburo, formando monóxido de carbono e hidrógeno:



Ahí ya se ha desprendido una gran parte de la energía química del combustible, pues se han roto todos sus enlaces. Después, el CO y el H<sub>2</sub> siguen buscando oxígeno para completar la reacción de oxidación. El más ávido por oxígeno es el hidrógeno, quedando:



Esa reacción también es muy energética, liberando mucha energía. Después el monóxido de carbono sigue buscando oxígeno en la cámara, pasando a dióxido de carbono, bajo la ecuación:



Estas dos últimas reacciones se hacen en paralelo, pero la del hidrógeno es mucho más rápida que la del monóxido de carbono. Así, se gastan los mismos oxígenos que en la reacción global, pero por partes.

Esto explica cómo, si se tiene una mezcla rica, con poco aire para el combustible, se completa la descomposición del combustible, casi todo el hidrógeno encontrará oxígeno, y será el CO el que se quede sin oxidar, de manera que con mezclas ricas aumenta mucho la emisión de monóxido de carbono.

Con mezclas pobres, con mucho aire, hay oxígeno suficiente para completar toda la reacción, sacando el máximo de energía por cada gramo de combustible.

Se puede observar también que es posible quemar mezclas ricas obteniendo mayor potencia, al desparecer todo el combustible, la energía total liberada va a ser mayor con mezclas algo ricas, por lo que se podrá obtener más potencia.

Por tanto, y cómo se ha comentado, la combustión requiere que el aire y el combustible se hallen mezclados en una proporción determinada, esta proporción entre el aire y el combustible es lo que se llama "relación estequiométrica". En un motor de gasolina la relación ideal es de 14,7:1, es decir son necesarios 14,7 gramos de aire por cada gramo de combustible para realizar una combustión perfecta. En la práctica esta proporción varía ligeramente, pudiendo alcanzar valores de 12 a 16, que serían los límites de funcionamiento de la combustión en el motor.

Con 12 gramos de aire por gramo de gasolina la mezcla que se obtiene es excesivamente "rica" en gasolina mientras que con una relación de 16, el motor no arrancaría por escasez ("pobre") de gasolina.

### **Mezcla pobre**

Resulta del exceso de aire en la mezcla. En estas condiciones en el motor se incrementa la temperatura de la combustión, facilitando la aparición de óxidos de nitrógeno (Nox), ademas si la mezcla es muy pobre, el combustible no llega a inflamarse y el motor se para.

### **Mezcla rica**

Se produce debido al exceso de combustible en la mezcla con respecto al aire que entra en la cámara de combustión del motor. En este caso el exceso de combustible no se puede combinar completamente con el aire, por lo tanto una parte del combustible es expulsado por el escape en forma de hollín y CO (monóxido de carbono).

En automoción se habla de factor lambda o relación "lambda" cuando quiere definirse la relación entre la cantidad de aire necesaria para producir una combustión completa, en relación estequiométrica y la cantidad de aire real que aspira el motor.

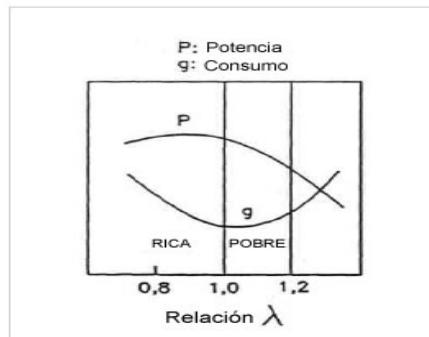
$$\text{Lambda } (\lambda) = \frac{\text{Masa real de aire}}{\text{Masa teórica del aire}}$$

Durante el funcionamiento del motor el factor lambda debe variar dentro de unos límites máximo y mínimo establecidos ya que el motor no puede estar alimentado constantemente con una mezcla en relación estequiométrica teórica, (esto es lambda = 1), puesto que en estas condiciones el motor no proporcionaría ni su potencia máxima ni el máximo rendimiento térmico.

En definitiva, el factor "lambda" da una idea muy precisa de la riqueza o pobreza de una mezcla, así se dice que:

- Con una relación "lambda = 1", se obtiene una combustión perfecta porque el aire aspirado coincide con el teórico (el aire aspirado es el 100 % del teórico necesario).
- Con una relación "lambda < 1", por ejemplo 0,8 indica escasez de aire por lo que la mezcla resulta rica de combustible (el aire aspirado es solo el 80 % del necesario).
- Con una relación "lambda > 1", por ejemplo 1,20 indica exceso de aire, por consiguiente una mezcla pobre (el aire aspirado es un 120 % del teórico, es decir un 20 % mas del necesario).

Como se puede ver en la gráfica inferior la potencia máxima en un motor otto se obtiene con una mezcla ligeramente rica, mientras que el consumo mínimo se consigue con una mezcla ligeramente pobre.



**Gráfica 1.** Proporción de la mezcla y sus efectos en la emisión de gases contaminantes

La relación aire/combustible (factor lambda) tiene una influencia decisiva sobre la emisión de los gases contaminantes, como son el monóxido de carbono (CO) y el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).

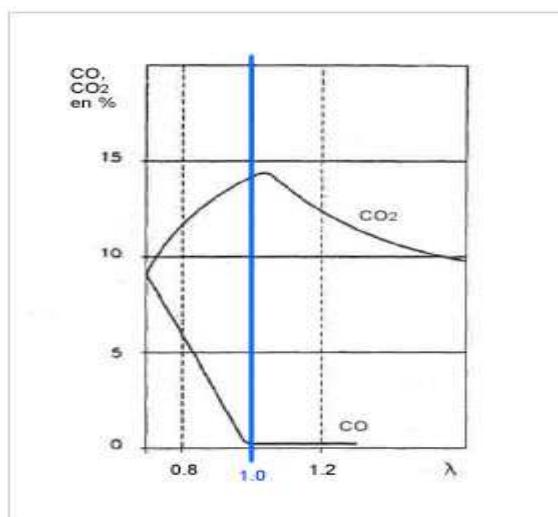
### **MONÓXIDO DE CARBONO (CO)**

La emisión de monóxido de carbono (CO) aumenta con las mezclas ricas, o sea para mezclas con un factor "lambda < 1". El oxígeno existente no es suficiente para completar la combustión, por lo cual el contenido de CO en los gases de escape es elevado. Por el contrario el monóxido de carbono (CO) disminuye con las mezclas pobres, o sea para mezclas con un factor "lambda > 1". El oxígeno presente es abundante y la combustión tiende a completarse, por lo cual el contenido de CO en los gases de escape alcanza valores mínimos.

### **DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)**

La concentración de CO<sub>2</sub> alcanza el valor máximo para coeficientes "lambda" cercanos a 1. El valor de CO<sub>2</sub> puede dar una idea de la "calidad" de la combustión, obsérvese que el pico de valor máximo corresponde prácticamente con una mezcla con un factor "lambda" ligeramente superior a 1,00.

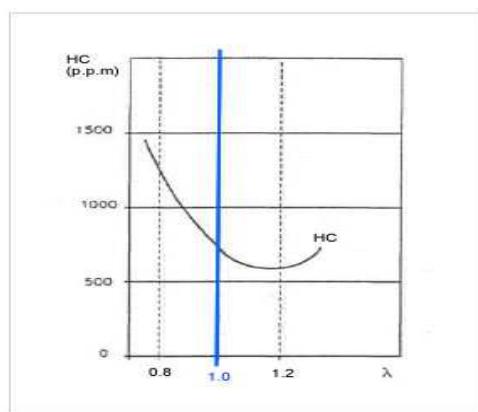
Conviene recordar que hasta no hace mucho tiempo, los fabricantes de automóviles, hacían trabajar los motores con mezclas ricas, necesarias entre otras cosas para poder obtener potencias específicas elevadas. En la actualidad, para conseguir una reducción de los consumos, la tendencia es a trabajar en el campo de las mezclas pobres.



**Gráfica 2. Relación entre lambda y el porcentaje de CO y CO<sub>2</sub>**

### **HIDROCARBUROS (HC)**

La concentración de hidrocarburos sin quemar se reduce a valores mínimos para relaciones aire-gasolina ligeramente superiores a la estequiométrica, es decir, para mezclas clasificadas como pobres ( $\lambda = 1,2$ ). Con mezclas ricas es imposible quemar por completo los hidrocarburos por falta de oxígeno. Por el contrario, con mezclas muy pobres ( $\lambda > 1,2$ ) se pueden tener retrasos en la combustión, dificultad de propagación de la llama o fallos de encendido al haberse superado los límites de inflamabilidad. En este caso la combustión resulta incompleta y se comprueba un aumento significativo de los HC emitidos en el escape.



**Gráfica 3. Relación entre lambda y la emisión de partículas de HC**

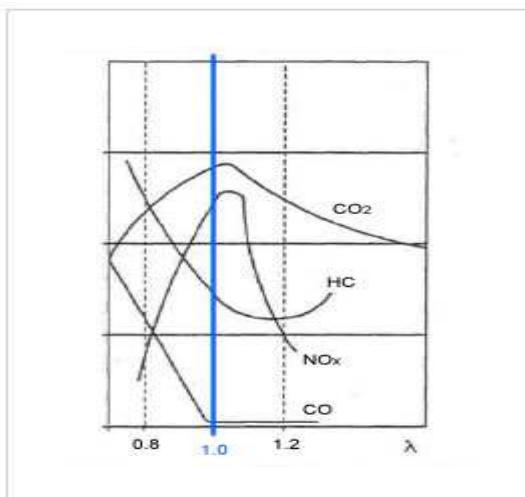
### **ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)**

La dosificación de la mezcla influye también en la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx).

Una mezcla pobre contiene una cantidad mayor de oxígeno que facilita la formación de NOx. Para valores " $\lambda = 1,1$ " (relación aire/gasolina de 16:1) ligeramente superior a la relación estequiométrica ( $\lambda = 1,0$ ) se obtiene la concentración máxima de NOx. Si aumenta aún más la dosificación, disminuye la temperatura de combustión y por consiguiente se reduce la cantidad de óxidos de nitrógeno aunque exista exceso de oxígeno.

La cuestión que se plantea ahora, una vez de analizados los datos expuestos mas arriba sobre la formación de los gases de escape, consiste en la imposibilidad de limitar al mismo tiempo los tres gases contaminantes principales: CO, HC y NOx , actuando únicamente sobre la dosificación de la mezcla. En efecto, en la zona de utilización del motor ( $\lambda = 0,8$  a  $1,1$ ), ocurre que a los valores mínimos de la emisiones de CO y HC corresponde el valor máximo de NOx.

Para conseguir al mismo tiempo una reducción drástica de CO y de NOx y obtener un buen comportamiento de los HC, sería preciso garantizar una combustión completa con un factor lambda superior a 1,05.



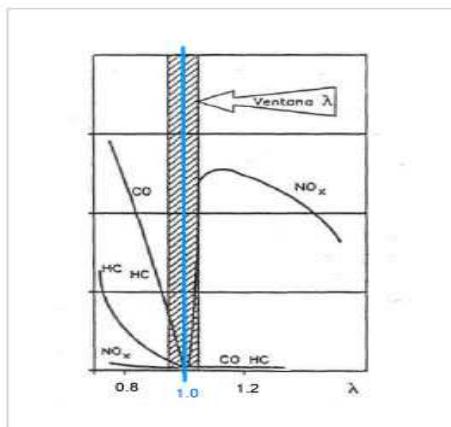
Gráfica 4. Resumen de relación de lambda y emisiones

Existe no obstante una zona llamada "ventana lambda" (puede verse en la Gráfica 5) donde la proporción de gases es mínima y si puede conseguirse que el motor trabaje en esta zona, se garantizará una reducción de los gases contaminantes.

Esta condición impone en la práctica buscar soluciones técnicas que garanticen el funcionamiento correcto en todas las condiciones de servicio del motor. Y la solución ha venido de diversas fuentes: la implementación de sistemas de inyección de gasolina con mando electrónico, la regulación de la mezcla para que trabaje cercana a la "ventana lambda" y el uso del catalizador.

De este modo se ha conseguido reducir la emisión de gases contaminantes mediante la optimización de la combustión y la depuración posterior de los gases.

La ilustración inferior muestra las gráficas de los distintos gases de escape después de atravesar el catalizador. Obsérvese como en la zona marcada como "ventana lambda" es donde coinciden los tres gases en la mínima concentrada



Gráfica 5. Ventana Lambda

En los MACI nos encontramos con dos procesos de combustión básicos, la combustión de Encendido Provocado y la combustión por Compresión, generando pues dos tipos de motores respectivamente, los MEP y los MEC.

### **3.1.2.- Motores de encendido provocado ( MEP)**

Cuando termina la compresión, en el motor Otto (MEP) se dispone de una mezcla de aire y combustible comprimida a una presión de, más o menos, 15 veces la de admisión (a plena carga, eso son unos 15 bares), y una temperatura, suponiendo un ambiente de 25°C, de unos 375°C. Por tanto, una vez finalizada la admisión, debido a la disminución del volumen del cilindro, se comprime un fluido formado por:

- Aire que proviene del proceso de admisión
- Gases residuales procedentes del ciclo anterior, o bien recirculados ( EGR)
- Combustible inyectado en el colector, en el caso de motores de inyección convencionales, en otros casos puede suceder que el combustible se inyecte directamente a la cámara de combustión ( motores de inyección directa)

Para que comience la reacción de combustión, hace falta que se aporte algo de energía a la mezcla, para elevar la temperatura, que genera la inflamación de la mezcla. Ese aporte de energía se realiza en motores Otto mediante el salto de una chispa eléctrica en algún punto de la cámara.

En ese momento, los gases que están cerca de la bujía reciben la descarga, aumentando su temperatura y reactividad, formándose una llama que avanza hasta llegar a las paredes, convirtiendo los reactantes en productos de la combustión.

Se genera pues una nube de gases, compuesta por los productos de la combustión del hidrocarburo y aire (dióxido de carbono, agua, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, etc.) a una temperatura muy alta (será del orden de 2700 K).

Esa nube está rodeada de gases más fríos, gases iguales a los originales (combustible y aire).

En esa situación se va a producir una transferencia de calor desde los gases calientes a los fríos, de manera que un nuevo estrato de mezcla fresca recibe calor de los gases calientes, aumentando su temperatura.

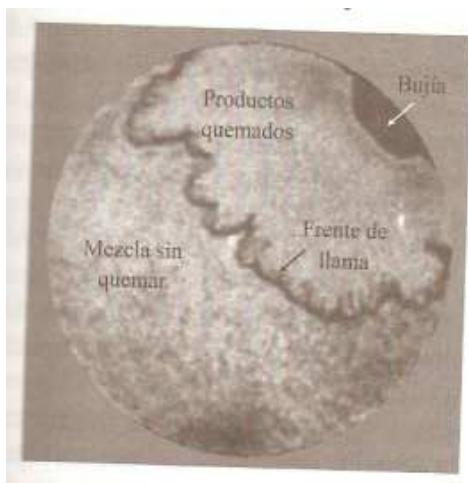


Imagen 1. Avance del frente de llama en la cámara de combustión en MEP

La transferencia de calor se puede producir también por una cierta convección y mezcla, ya que la combustión genera mucha turbulencia en los gases. Estos últimos gases que reciben el aporte de temperatura terminan combustionando al igual que la nube inicial.

Si se observa el fenómeno desde fuera, lo que se ve es un frente de llama que va avanzando por la cámara, haciendo que reaccione la mezcla. La velocidad del frente de llama es del mismo orden de magnitud que la velocidad del pistón (aprox. 15 m/s), ésta dependerá de cómo se transfiera el calor desde los gases calientes hacia los fríos, y del tiempo que transcurra hasta que combustionen. La transferencia de calor va a depender sobre todo del nivel de turbulencia generado en la admisión, y este nivel de turbulencia será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad de paso de los gases.

De esta forma, la velocidad del frente de llama se puede suponer, como ya se ha comentado, proporcional al régimen de giro del motor, y se llega a que el ángulo de giro de cigüeñal ocupado por la combustión, casi no depende del régimen. Este hecho hace que el límite de régimen de giro del motor de gasolina venga dado por el llenado y la resistencia de los materiales, pero no por la combustión.

Una manera de reducir esa duración angular de la combustión es la utilización de dos bujías por cilindro. En ese caso se generan dos frentes de llama, que se acabarán juntando en algún punto de la cámara.

Siguiendo con la velocidad del frente de llama, se puede comentar también que la riqueza de la mezcla influye de manera decisiva en la misma, de manera que con mezclas ligeramente ricas, factores lambda de 0.85 aproximadamente, que es donde la producción es mayor, la velocidad del frente es máxima.

A medida que se empobrece la mezcla, va disminuyendo la producción, haciéndose tan lenta con lambdas de 1.15 que el ciclo llega a perder rendimiento, porque la combustión se prolonga mucho durante la expansión.

Y para mezclas más pobres, puede llegar el caso de que aún haya llama en el cilindro al terminar el escape, y cuando se abre la válvula de admisión puede propagarse hacia el colector, provocando explosiones en la admisión muy peligrosas para el motor.

A medida que se va efectuando el proceso, los gases que aún no se han quemado, van aumentando su temperatura, sometidos a la presión creciente que está habiendo en la cámara. Si la temperatura de esos gases llega a ser muy alta, es posible que ellos solos entren en ignición, sin necesidad de que llegue el frente de llama. En ese caso se produce lo que llamamos detonación o que también se conoce como picado de bielas.

Otra cosa que puede pasar durante el proceso es que se apague la llama. Puede ser al principio del proceso, porque la chispa no haya sido demasiado potente, y aunque se queme una pequeña cantidad de mezcla, no haya energía para calentar suficientemente a lo que tiene alrededor.

También se puede apagar la llama en medio de la combustión, normalmente porque se encuentren zonas de baja concentración de combustible. Ésto se llama "misfire", y es típico de motores que funcionan con mezcla pobre.

Finalmente, la llama se termina apagando cuando llega a las proximidades de las paredes. Los gases que están allí reciben el calor proveniente de los gases calientes, pero en vez de aumentar su temperatura, al estar pegados a la pared lo conducen hacia ella, así que no se calientan y por tanto no se queman. El gas que está en medio de la cámara no puede conducir el calor hacia atrás, por eso sí que se calienta.

De esta forma, siempre hay una película de gas, pegada a la pared, que no se quema. Es la principal fuente de emisión de hidrocarburos in quemados del motor (que después se oxidan en el catalizador).

Realmente, el proceso es aproximadamente como se ha descrito en estas líneas, sin embargo, es preciso hacer una apreciación. La propagación de la llama no se produce de una manera homogénea en todas las direcciones, durante el proceso de admisión, cuando el gas pasa por la válvula, se generan hilos de torbellino, de diámetro relativamente pequeño (microturbulencia), que son repartidos por toda la cámara. Así podemos entender que en la cámara hay una maraña de torbellinos, que encierra también zonas de bajo movimiento del fluido. La llama progresiona a gran velocidad por esos torbellinos, y algo más lenta en los valles entre los mismos.

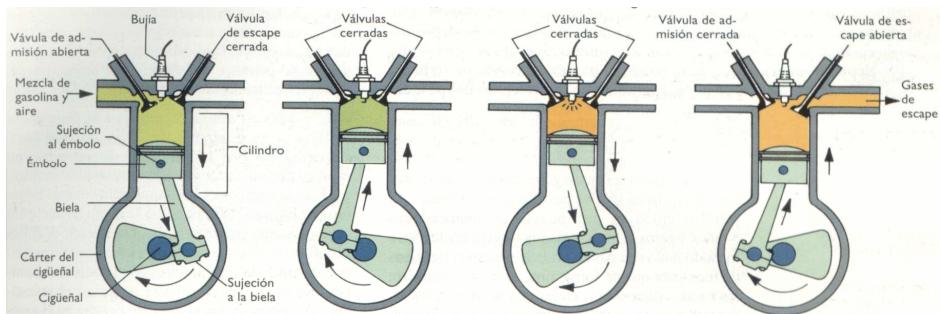


Imagen 2. Procesos en MEP

Para finalizar con los motores de encendido provocado es preciso comentar una puntuación correspondiente al inicio del proceso. Lo que ocurre desde que salta la chispa hasta que se genera el frente de llama y comienza la combustión pasa un cierto tiempo, que se llama "tiempo de retardo". Ese tiempo de retardo depende de la presión y temperatura, y durante ese tiempo el cigüeñal gira cierto ángulo, que obviamente vamos a llamar "ángulo de retardo".

El tiempo de retardo no depende de la velocidad de giro del motor, pero el ángulo sí, así que como normalmente se pretende que el comienzo de la combustión sea siempre en el mismo sitio, el adelanto al encendido deberá variar con la presión y el régimen. De aquí provienen los antiguos sistemas de avance centrífugo y avance por depresión, que actualmente han sido sustituidos por controles electrónicos con una cartografía que da el avance óptimo en función de esos valores, presión y régimen de giro.

### **3.1.3.- Motores de encendido por compresión ( MEC)**

Si analizaramos los diagramas P-V correspondientes al Otto y Diesel observaríamos que las diferencias son pequeñas, pudiendo destacarse, además de las diferencias en el proceso de combustión, el que la relación de compresión y la presión máxima de combustión en los MEC son más elevadas.

A continuación se hace un análisis semejante al realizado en los MEP, pero remarcando únicamente las diferencias existentes.

Con respecto al proceso de compresión recalcar que:

- El fluido que se comprime consta de aire y residuales, y es muy destacable el uso del EGR, sistema de recirculación de los gases de escape que comentaremos más adelante, de modo que el considerar que el fluido que evoluciona como aire se aleja más de la realidad que en los MEP.
- La relación de compresión en los MEC es más elevada que los MEP y además suelen estar sobrealimentados (concepto que también se analizará posteriormente), ello conduce a mayores fugas.

Es en el proceso de combustión donde aparecen las diferencias más notables:

- El proceso en los MEC se realiza por autoencendido y además gran parte es controlado por la inyección.

Con el objetivo básico y fundamental de reducir tanto las emisiones de partículas como de óxidos de nitrógeno se utilizan dos estrategias principalmente para conseguir una combustión con un dosado local pobre, de modo que se evite la formación de hollín, y manteniendo a la vez la temperatura de combustión por debajo de los 2200 K evitando también la formación de NOx.

Los dos tipos de combustión utilizados son por un lado la combustión premezclada y por otro el mantener la combustión clásica controlada por la mezcla que produce el chorro Diesel, pero asegurando una longitud de lift-off que garantize un dosado local pobre.

- Combustión de baja temperatura controlada por mezcla: Este proceso es conocido como el LTC. En este caso se produce un chorro de combustible típico de la combustión Diesel controlada por difusión, pero se persigue mejorar el englobamiento del aire hasta la sección lift-off.
- Combustión con fase premezclada: El modelo ideal de este tipo de combustión es el conocido como HCCI ( Homogeneous Charge Compression Ignition). Esta denominación implica que la combustión se realiza en una mezcla de aire y combustible homogénea, pero que se autoenciende debido a la temperatura alcanzada en la compresión. A diferencia de las combustiones clásicas de los MEC la combustión no se produce en un lugar puntual del chorro de combustible, sino casi simultáneamente en todo el volumen, y tampoco aparece un frente de llama.

Del proceso de expansión es destacable la semejanza entre los dos procesos ( Otto y Diesel) siendo únicamente remarcable que las fugas en el cilindro pueden ser más importantes en los MEC por ser la presión en el cilindro más elevada durante la carrera de expansión.

### **3.1.4.- La formación de contaminantes**

Tras este análisis básico de los principales ciclos de combustión, procederemos a dar las nociones fundamentales (puesto que en apartados posteriores nos centraremos detenidamente) de la formación de los contaminantes, consecuencia de los procesos característicos comentados anteriormente, ya que es esta contaminación química la que en mayor medida condiciona el diseño de los motores actualmente.

Estudiaremos la generación de estas sustancias contaminantes tanto en los MEP como en los MEC y anotaremos sin entrar en profundidad (ya que se hará más adelante) las estrategias más comunes para evitarlas.

### **3.1.4.1 Productos contaminantes en los MEP**

En el caso de los MEP los componentes nocivos más destacables son el CO, los NOx y los HC (hidrocarburos sin quemar). Es habitual analizar el efecto del dosado en las emisiones, a pesar de que los motores gasolina van actualmente equipados con un catalizador de tres vías (cómo se verá más adelante) que exige el funcionamiento con dosado estequiométrico.

Las principales razones de la generación de cada producto contaminante son:

#### **CO**

La emisión de CO aparece cuando la mezcla es rica. De hecho tiene relación con la combustión incompleta.

#### **NOx**

Por un lado, es necesaria una temperatura alta y por otro la aprición de oxígeno. Las temperaturas de combustión son máximas en torno al estequiométrico, y el oxígeno es tanto más abundante conforme la mezcla es pobre.

#### **HC**

Los hidrocarburos in quemados son también producto de una combustión incompleta, generándose esta en dos situaciones: en casos de dosado rico (al no existir suficiente oxígeno para oxidar el combustible una parte permanece si quemar) y en dosado pobre en este caso las dificultades de propagación del frente de llama puede provocar que algunas partes no se quemen al tener lugar el apagado de llama antes comentado.

Aparte de la dependencia del dosado, esta fuertemente ligada su emisión a otros casos que a continuación se recalcan:

- Cortocircuito: Durante el cruce de válvulas, están simultáneamente abiertas admisión y escape, y parte de la mezcla puede escapar, de manera que es expulsada sin combustionar.
- Absorción de HC en el aceite: Durante la fase de compresión, parte de los HC que componen la mezcla ubicada en las paredes del cilindro son absorbidas por el aceite que permanece en la porosidad de la pared. Parte de estos hidrocarburos no se queman.

Es importante resaltar que en motores de inyección directa con carga estratificada este fenómeno se minimiza puesto que prácticamente no queda combustible en las proximidades de las paredes.

-Efecto pared: Como se ha comentado anteriormente la llama sufre un apagado al llegar a las proximidades de la pared, especialmente en zonas que presentan rincones. Todas estas zonas presentan volúmenes en donde se acumulan pequeñas cantidades de mezcla sin quemar.

Finalmente es importante comentar las peculiaridades que aparecen en vehículos de inyección directa en lo que a emisiones se refiere. Por una lado se evita el cortocircuito, ya que se inyecta una vez la válvula de escape está cerrada y en caso de carga estratificada se evita la absorción del combustible por parte del aceite. Sin embargo en el caso de carga estratificada aparece el riesgo de inquemados por apagado de llama. Para terminar comentar que dada la posible heterogeneidad de la mezcla pueden existir zonas ricas que conduzcan a la aparición de hollín, el cuál es inexistente en los motores con inyección en el colector de admisión.

### **3.1.4.2 Productos contaminantes en los MEC**

Para el análisis de la generación de productos contaminantes en motores diesel es muy útil apoyarse en el esquema de la estructura de la llama Diesel, en este caso en la fase cuasiestática de la fase de combustión por difusión antes puntualizada en el apartado de Motores de encendido por compresión.

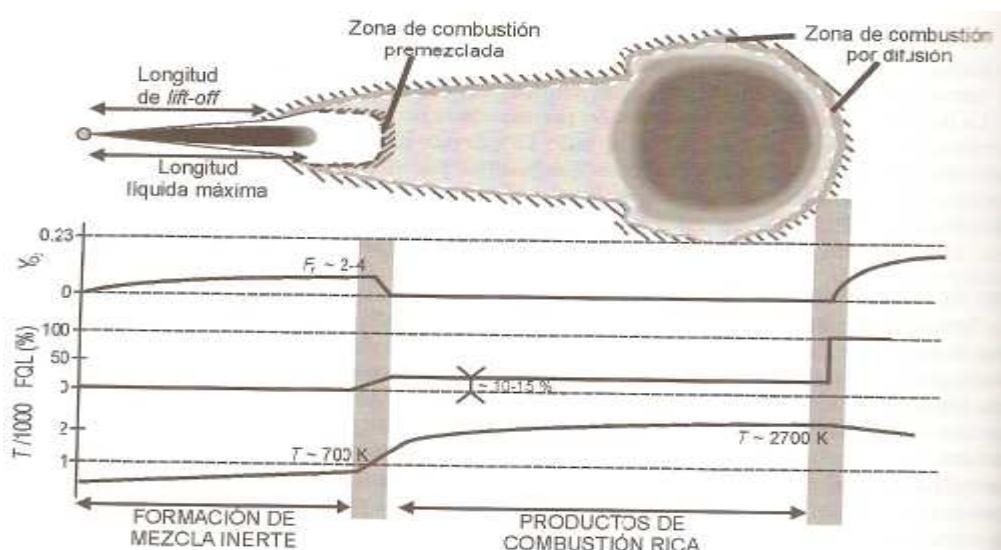
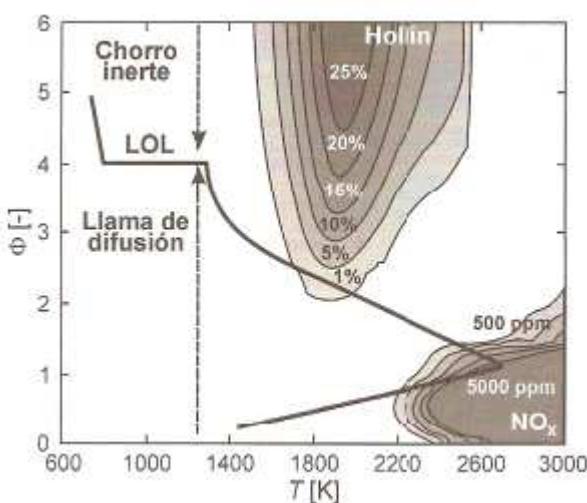


Imagen 3. Esquema de la estructura de la llama Diesel en la fase cuasiestática de a fase de combustión por difusión.

Es importante destacar que la formación de hollín se genera en dosados ricos y altas temperaturas, y los óxidos de nitrógeno a dosados estquiométricos pobres y altas temperaturas. Por ello es posible escapar de la zona de formación de contaminantes cumpliendo dos condiciones: combustión por dosado pobre y con bajas temperaturas de llama.



Gráfica 6. Mapa dosado-temperatura de formación de  $NO_x$  y hollín

Apoyádonos en la imagen superior se va como hasta la distancia del lift-off ó distancia de despegue de la llama, no hay formación de contaminantes por ser la mezcla inerte.

Al atravesar el frente de llama existente, el combustible se calienta y entra en la zona interna de la llama por difusión, donde encontramos dosados ricos a alta temperatura.

En la figura se evidencia como a medida que el combustible se acerca al dosado estequiométrico ( donde está el frente de llama) atraviesa la zona de formación del hollín, con lo que aparece esta sustancia.

Finalmente se observa como la llama atraviesa la zona de formación del  $NO_x$  para dosados cercanos al estequiométrico y pobres, ello indica que este contaminante se forma en el exterior de la superficie de reacción, donde los dosados son pobres y las temperaturas altas.

Lo anterior evidencia que los Diesel generan principalmente estos dos contaminantes. Es en esta situación donde se evidencia la importancia del estudio de la combustión premezclada, que radica en su potencial de reducción de las emisiones de  $NO_x$ .

El mayor atractivo de la combustión premezclada es que puede reducir la generación de NOx entre un 90 % y un 98 % en comparación con la combustión controlada por mezcla. La ausencia de un frente de llama en la combustión premezclada y el uso de mezclas pobres hace que las temperaturas de combustión sean muy bajas evitando la formación de NOX.

Los estudios demuestran que este tipo de combustión también reduce la aparición de hollín. No obstante las investigaciones muestran que la pequeña masa de partículas emitidas en esta combustión está compuesta por numerosas partículas de pequeño diámetro, del orden de 10 nm, lo que las hace más peligrosas para la salud.

### **3.1.4.3.- Métodos de reducción de emisiones contaminantes**

La restrictiva normativa anticontaminante (que se analizará más adelante) hace necesario el apoyo en estrategias, en este caso dos básicas, para la reducción de emisiones.

- Soluciones activas: Que tratan de evitar su formación
- Soluciones pasivas: Que tratan de eliminarlas una vez creadas.

Una de los principales sistemas incorporados ha sido el catalizador de tres vías, que permite actuar sobre los tres compuestos principales.

El uso de este sistema, que actúa sobre todos los compuestos contaminantes generados, puede hacer pensar que el uso de otros sistemas carecería de sentido, por ejemplo el uso de EGR que es un excelente sistema de reducción del NOx, la cuestión es que en estos casos el EGR se usaría para el aumento del rendimiento a baja carga y el evitar la combustión por autoinflamación.

Obviamente se generan excepciones, como sería en el caso de los motores de inyección directa en los que en determinadas condiciones de carga estratificada, como puede ser en condiciones pobres, el catalizador de tres vías no puede operar correctamente, de hecho puede oxidar el CO y los HC pero no reducir el NOx. La solución más adoptada son las trampas de NOx, que es un tipo de filtro químico que es capaz de almacenar los NOx que no puede eliminar el catalizador.

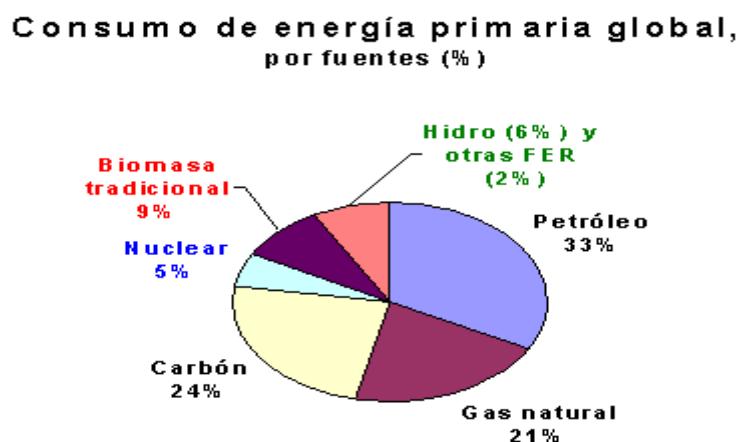
Todo esto se comentará de manera más exhaustiva en el desarrollo del estudio.

### **3.2.- El petróleo**

El modelo energético actual se basa mayoritariamente en el consumo de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía eléctrica. Hoy en día, dos factores ponen en entredicho la supervivencia de este modelo, en pie desde comienzos del Siglo XX. Dichos factores son el agotamiento de las reservas de combustible y el calentamiento global.

Según la teoría de *Pico de Hubbert* el agotamiento de las reservas de petróleo y gas natural podría ser un hecho antes de que acabe el presente Siglo XXI. Por otro lado, cada vez son más los científicos y grupos de opinión que alertan sobre el comienzo de un período de calentamiento global asociado al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero. Aun cuando todavía no hay acuerdo sobre la inminencia y el alcance de ambos problemas, existe un consenso generalizado sobre el hecho de que tarde o temprano, el ser humano deberá de dejar de utilizar los combustibles fósiles como su principal fuente de energía primaria y decantarse por fuentes más seguras, abundantes y menos dañinas para el medio ambiente

En el presente los combustibles fósiles forman parte en un elevado porcentaje de la energía primaria que se consume en el mundo, de ese porcentaje, un 38% es carbón, 40% es petróleo y 19% es gas natural. ( Estos valores están expuestos a variación con una cierta tolerancia dependiendo de las fuentes consultadas, como se observa en la Gráfica 7).



Gráfica 7. Consumo de energía primaria global

Estas generan contaminación y no son renovables. No obstante, existen diversas opciones de generación eléctrica ajena a los combustibles fósiles que podrían mitigar la dependencia que la sociedad moderna tiene de estos recursos escasos y contaminantes. Algunas de estas opciones ya están disponibles y otras son meras hipótesis, y cada una genera distintos y enfrentados puntos de vista sobre sus supuestas ventajas e inconvenientes.

Lo que es un hecho es la tendente preocupación mundial surgida en torno a la situación y que se agrava debido que al ser un recurso agotable, genera el encarecimiento de precios, con una absoluta dependencia mundial, que llega incluso a verse proyectada en conflictos internacionales, amparados por el control de las reservas de crudo. Y es todo esto lo que evidencia el cuestionamiento del modelo.

### **3.2.1.- Historia del petróleo**

Desde la antigüedad el petróleo aparecía de forma natural en ciertas regiones terrestres como son los países de Oriente Medio. Hace 6.000 años en Asiria y en Babilonia se usaba para pegar ladrillos y piedras, en medicina y en el calafateo de embarcaciones; en Egipto, para engrasar pieles; las culturas precolombinas de México exactamente en Talpa de Allende pintaron esculturas con él; y los chinos ya lo utilizaban como combustible.

La primera destilación de petróleo se atribuye al sabio árabe de origen persa Al-Razi en el siglo IX, inventor del alambique, con el cual obtenía queroseno y otros destilados, para usos médicos y militares. Los árabes a través del Califato de Córdoba, actual España, difundieron estas técnicas por toda Europa.

Durante la Edad Media continuó usándose únicamente con fines curativos.

En el siglo XVIII y gracias a los trabajos de G. A. Hirn, empiezan a perfeccionarse los métodos de refinado, obteniéndose productos derivados que se utilizarán principalmente para el engrasado de máquinas.

En el siglo XIX se logran obtener aceites fluidos que empezaran pronto a usarse para el alumbrado. En 1846 el canadiense A. Gesnerse obtuvo queroseno, lo que incrementó la importancia del petróleo aplicado al alumbrado. En 1859 Edwin Drake perforó el primer pozo de petróleo en Pensilvania.

La aparición de los motores de combustión interna abrió nuevas e importantes perspectivas en la utilización del petróleo, sobre todo en uno de los productos derivados, la gasolina, que hasta entonces había sido desecharla por completo al no encontrarle ninguna aplicación práctica.

El 14 de septiembre de 1960 en Bagdad, (Irak) se constituye la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) [1] , fundada por el Ministro de Energías venezolano Juan Pablo Pérez Alfonso, junto con un grupo de ministros árabes.

Es de señalar, que derivado de la crisis del petróleo de 1973 y como respuesta a la OPEP, en 1974 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OCDE [2] , crea la Agencia Internacional de Energía o AIE [3], con el objetivo de que los países consumidores de crudo coordinaran la medidas necesarias para asegurar el abastecimiento del petróleo.

Las principales empresas estatales son Aramco [4] (Arabia Saudita), National Iranian Oil Company [5] (Irán), Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima PDVSA [6] (Venezuela), China National Petroleum Corporation [7], Kuwait Petroleum Company [8], Sonatrach [9], Nigerian National Petroleum Corporation[10], Libya National Oil Co [11], Petróleos Mexicanos (PEMEX) [12](Méjico) y Abu Dhabi National Oil Co [13]. En el caso de la mayor empresa rusa, Lukoil [14], la propiedad gubernamental es parcial.

### **3.2.2.- La contaminación**

El petróleo tiene el problema de ser insoluble en agua y por lo tanto, difícil de limpiar. Además, la combustión de sus derivados produce productos residuales: partículas, CO<sub>2</sub>, SOx (óxidos de azufre), NOx (óxidos nitrosos), etc.

En general, los derrames de hidrocarburos afectan profundamente a la fauna y vida, razón por la cual la industria petrolera mundial debe cumplir normas y procedimientos estrictos en materia de protección medioambiental.

Casi la mitad del petróleo y derivados industriales que se vierten en el mar, son residuos que vierten las ciudades costeras. El mar es empleado como un accesible y barato depósito de sustancias contaminantes.

Otros derrames se deben a accidentes que sufren los grandes barcos contenedores de petróleo, que por negligencia transportan el combustible en condiciones inadecuadas.

De cualquier manera, los derrames de petróleo representan una de las mayores causas de la contaminación oceánica. Ocasionan gran mortandad de aves acuáticas, peces y otros seres vivos de los océanos, alterando el equilibrio del ecosistema.

En las zonas afectadas, se vuelven imposibles la pesca, la navegación y el aprovechamiento de las playas con fines recreativos.

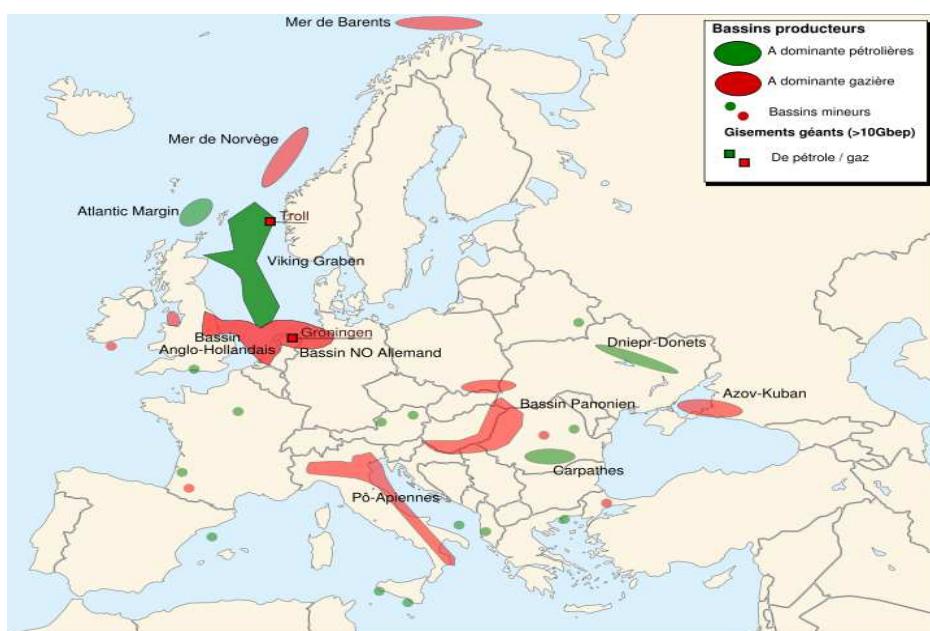
Por otro lado, otra más que conocida consecuencia de su uso es el efecto invernadero, generado por la combustión de los derivados del petróleo que cómo ya se sabe es una de las principales causas de emisión de CO<sub>2</sub>, cuya acumulación en la atmósfera favorece el cambio climático.

### **3.2.3.- Reservas petrolíferas**

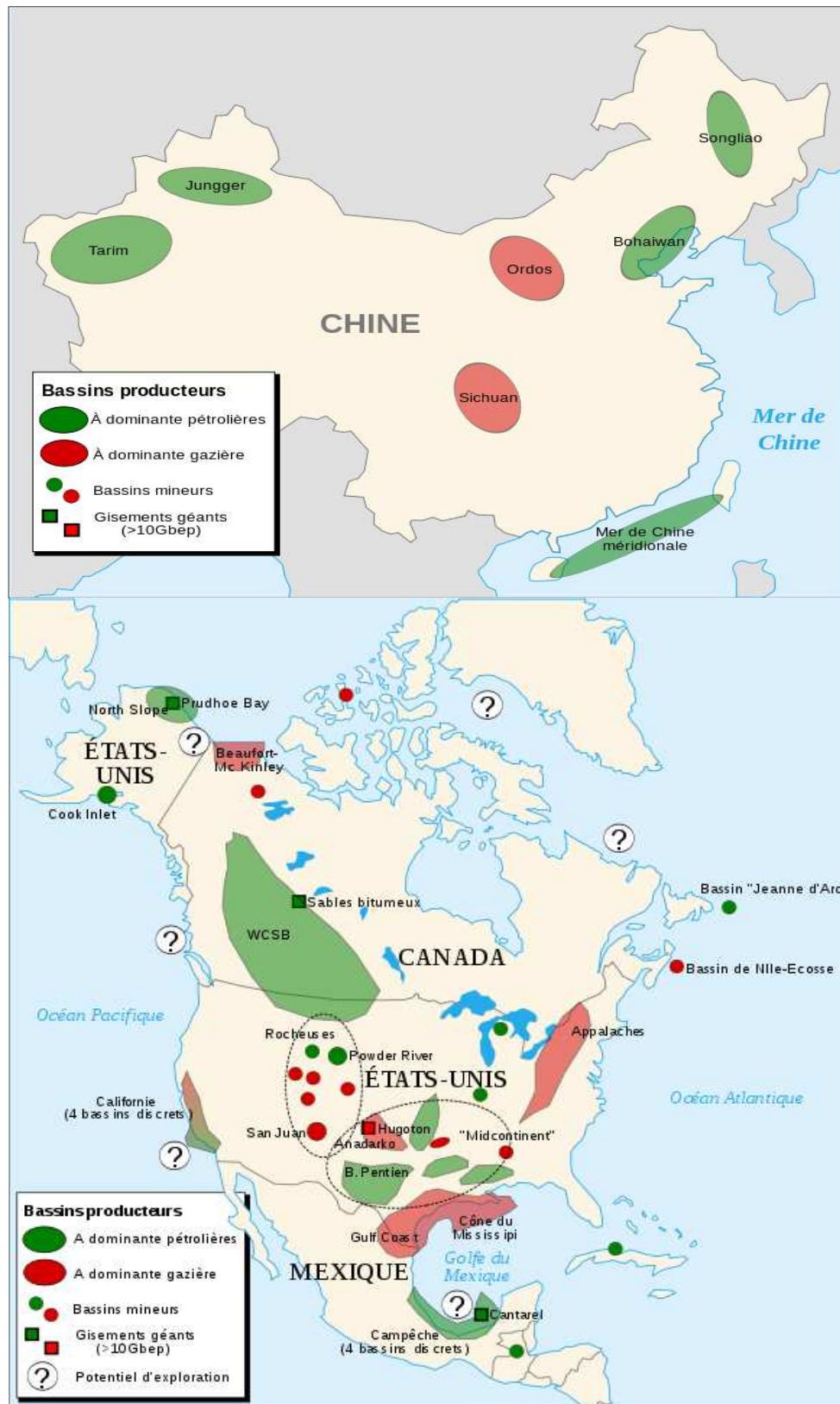
Muchas son las cifras que rodean este hecho y son muy dependientes de las fuentes que las publican, pero se estima de manera general que quedan unas 143.000 millones de toneladas de crudo.

Hay entre 6,8 y 7,2 barriles de petróleo por tonelada, en dependencia de la densidad del petróleo. Por tanto, las reservas de crudo se calculan entre 0,97 y 1,003 billones de barriles de petróleo.

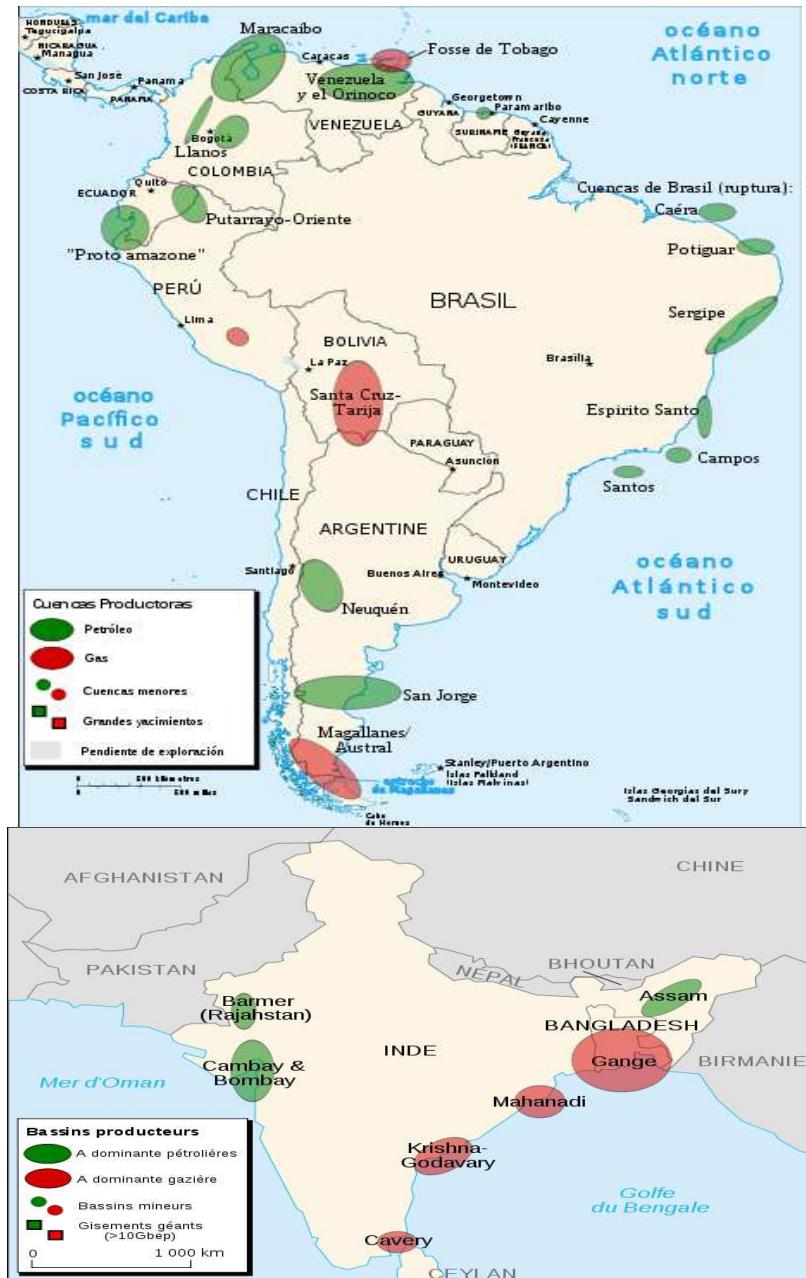
En estas imágenes se observa la localización mundial de las principales reservas de combustibles fósiles:



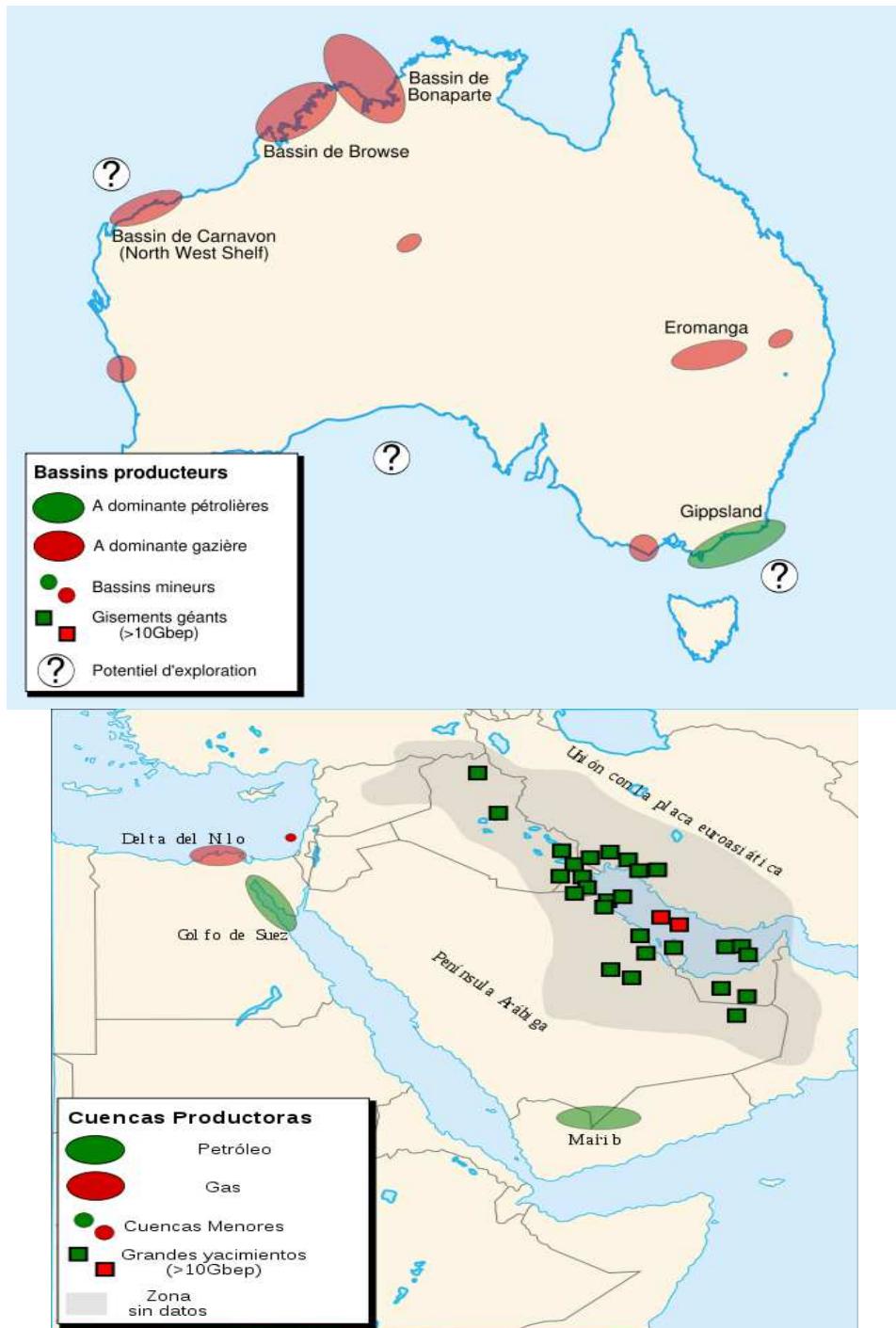
**Análisis y estudio de Sistemas de Aumento de Rendimiento  
Y Reducción de Emisiones en MACI**

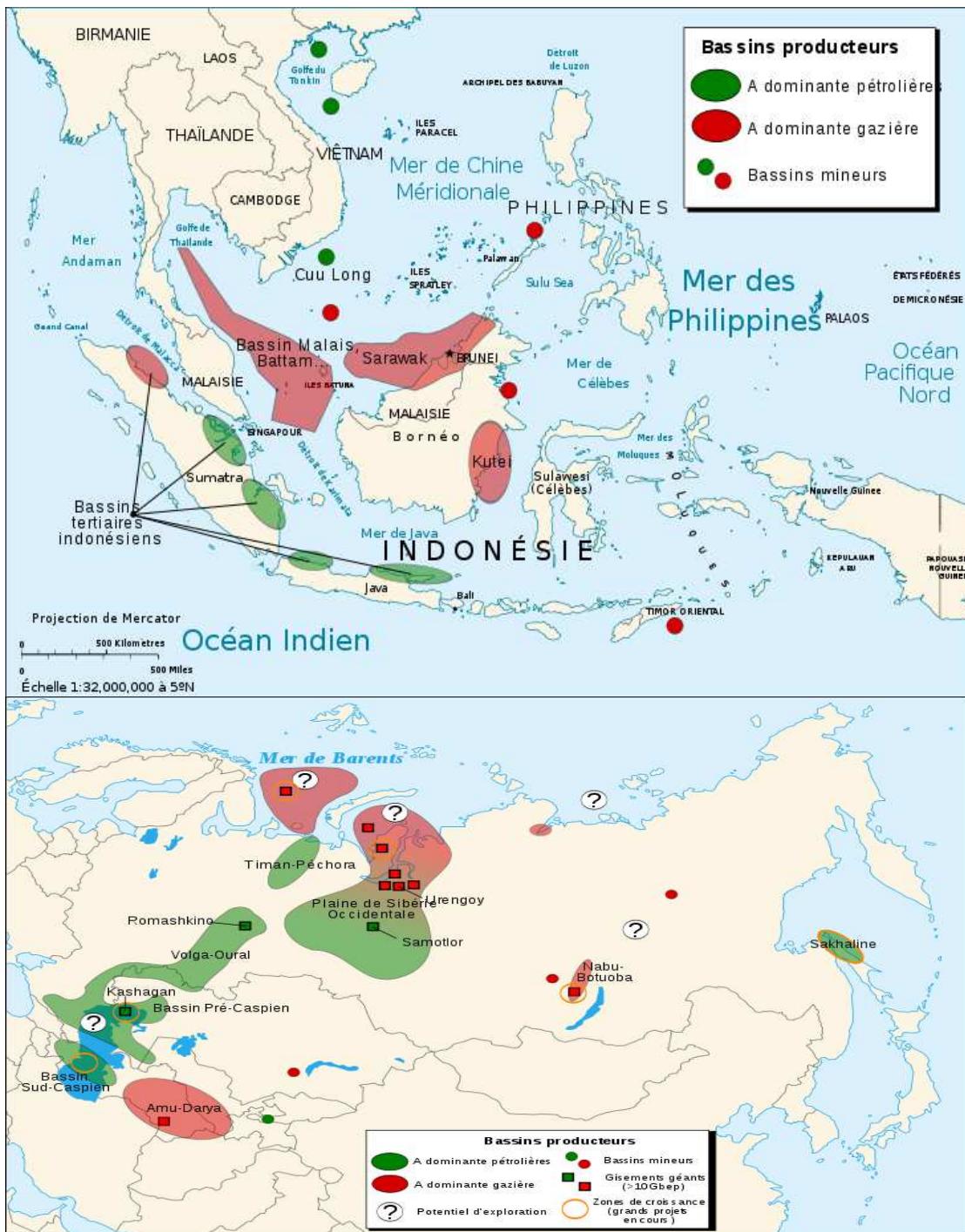


## Análisis y estudio de Sistemas de Aumento de Rendimiento Y Reducción de Emisiones en MACI



## Análisis y estudio de Sistemas de Aumento de Rendimiento Y Reducción de Emisiones en MACI





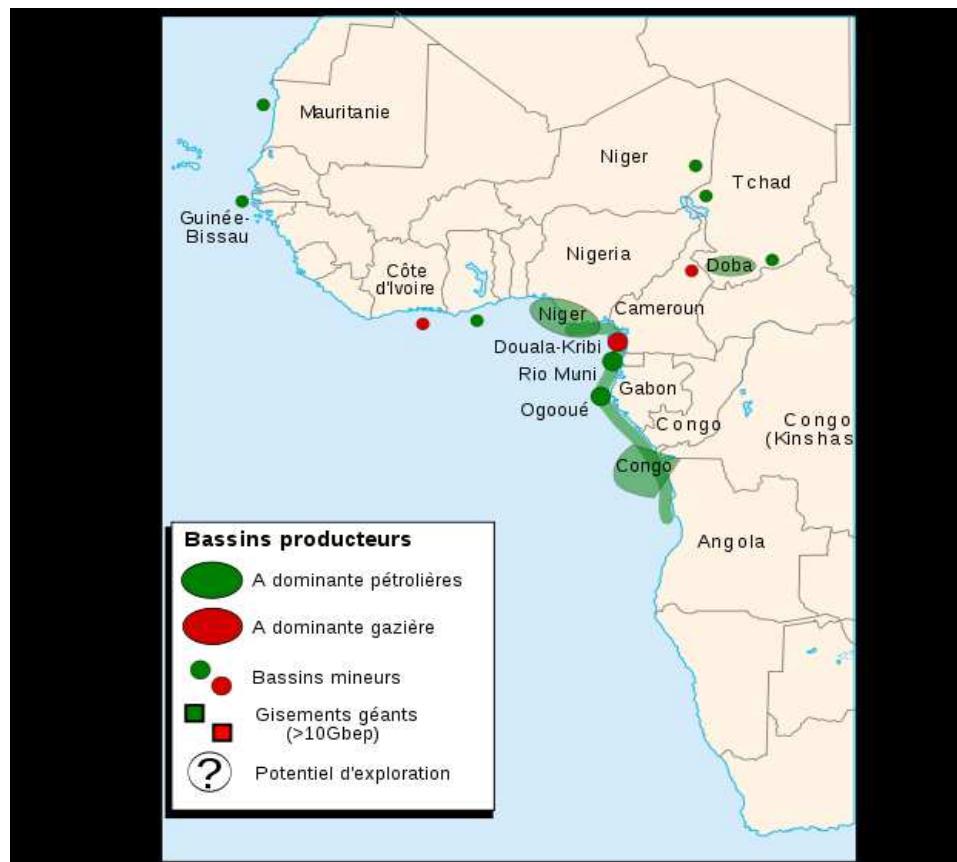


Imagen 4. Reservas petrolíferas y de gas mundiales

En este cuadro se analizan las reservas anuales estimadas de combustibles fósiles en la actualidad:

	Reservas		Producción anual		R/P
	m <sup>3</sup>	Julios	m <sup>3</sup>	Julios	
Petróleo crudo	$1.9 \times 10^{11}$	$6.8 \times 10^{21}$	$4.7 \times 10^9$	$1.7 \times 10^{20}$	41
Gas natural	$1.8 \times 10^{14}$	$6.4 \times 10^{21}$	$2.7 \times 10^{12}$	$9.6 \times 10^{19}$	67
Carbón	$8.0 \times 10^{17}$	$1.7 \times 10^{22}$	$2.9 \times 10^{15}$	$6.1 \times 10^{19}$	277
<b>TOTAL</b>		$3.0 \times 10^{22}$		$3.3 \times 10^{20}$	93

Reservas anuales de eficacia probada y producción anual de hidrocarburos en términos de volumen (m<sup>3</sup> de gas en condiciones estándar de 1 bar, 15°C) y en términos de contenido de energía. R/P es la proporción de la reserva en relación a la producción anual, dando la cantidad de años que las reservas conocidas durarán si se siguen explotando en la tasa de producción actual.

Fuente de datos: revisión estadística BP ([www.bp.com](http://www.bp.com))

Tabla 1. Reservas y producción anual de hidrocarburos a nivel mundial [15]

Sin embargo el límite de las reservas podría estar más cercano aún si se tienen en cuenta modelos de previsión con un consumo creciente como ha venido siendo norma a lo largo de todo el siglo pasado. Los nuevos descubrimientos de yacimientos se han reducido drásticamente en las últimas décadas haciendo insostenible por mucho tiempo los elevados niveles de extracción actuales, sin incluir la futura demanda de los consumidores asiáticos. Por otra parte, la mayoría de las principales reservas mundiales han entrado en declive y solo las de Oriente Medio mantienen un crecimiento sostenido, y tendente a la baja, lo que provocaría que toda la producción mundial disminuyera irremediablemente, conduciendo a la mayor crisis energética que haya sufrido el mundo industrializado.

Según la Teoría del pico de Hubbert, actualizada con datos recientes por la Asociación para el estudio del pico del petróleo, el inicio de dicho declive se habría producido en torno a 2007.

### **3.2.2.1.- La teoria del pico de Hubbert**

La teoría del pico de Hubbert, también conocida como cenit del petróleo, petróleo pico o agotamiento del petróleo, es una influyente teoría acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo, así como de otros combustibles fósiles. Predice que la producción mundial de petróleo llegará a su cenit y después declinará tan rápido como creció, resaltando el hecho de que el factor limitador de la extracción de petróleo es la energía requerida y no su coste económico. La teoría debe su nombre al geofísico M. King Hubbert, quien predijo correctamente el pico de la producción estadounidense con quince años de antelación.

Aún siendo controvertida, esta teoría es ampliamente aceptada entre la comunidad científica y la industria petrolera.

El debate no se centra en si existirá un pico del petróleo sino en cuándo ocurrirá, ya que es evidente que el petróleo es un recurso finito y no renovable en escalas cortas de tiempo por lo que en un momento u otro se llegaría al límite de extracción. Esto depende de los posibles descubrimientos de nuevas reservas, el aumento de eficiencia de los yacimientos actuales, extracción profunda o la explotación de nuevas formas de petróleo no convencionales.

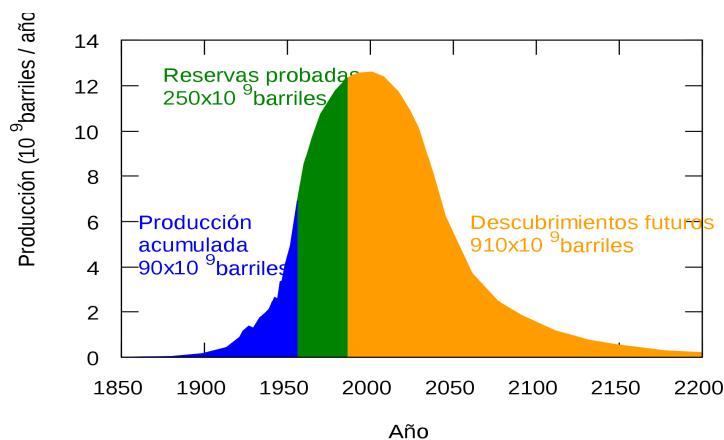
El año exacto del pico todavía no ha sido establecido con precisión, si bien La Agencia Internacional de la Energía (AIE) hizo público en noviembre de 2010, que la producción de petróleo crudo llegó a su pico máximo en 2006. Basándose en los datos actuales de producción, la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO en inglés) [16], considera que el pico del petróleo habría ocurrido en 2010, mientras que el del gas natural ocurriría algunos años más tarde. Por el contrario, las estimaciones de los más optimistas arrojan reservas para al menos 100 años más.

Este hecho implicaría importantes consecuencias para los países desarrollados, que dependen en gran medida de petróleo barato y abundante, especialmente para el transporte, la agricultura, la industria química y la calefacción doméstica.

Algunos críticos afirman que la escasez motivará la búsqueda de nuevos descubrimientos y que las reservas se incrementarán por encima de lo predicho por Hubbert. Pero incluso en la versión más optimista la limitación de los recursos petroleros pone una fecha límite a la extracción barata de ese recurso. Nadie parece negar la existencia de un techo de producción pero pocos son los gobiernos y empresas que hasta ahora lo han mencionado abiertamente.

De entre estos cabe citar por ejemplo a la multinacional estadounidense ChevronTexaco [17] que han lanzó, la campaña publicitaria para concienciar al público estadounidense de la necesidad de actuar ante el inminente agotamiento del petróleo. También la multinacional española Repsol-YPF [18] expuso ya públicamente en una conferencia de la cuestión haciendo uso de los mismos gráficos del ASPO.

La llegada de ese pico de extracción hace pensar en un sombrío futuro en el que la humanidad tendrá que sobrevivir sin la principal fuente de energía que la ha hecho crecer y prosperar durante todo el siglo XX.



Gráfica 8. Teoría del Pico de Hubbert

### **3.2.4.- El precio del petróleo**

En enero de 1999, cuando nació la moneda única en Europa, el precio del crudo de referencia, el Brent, estaba en torno a los 10 dólares por barril, casi su nivel más bajo desde el primer gran choque del petróleo en 1973-1974. A mediados de octubre de 2000, cuando el euro tocaba su punto más bajo contra el dólar (0,82), el barril de Brent estaba por encima de los 33 dólares. En 2005, el Brent tocó los 55 dólares por barril y en este 2012 nos encontramos con precios próximos a los 100 dólares, que como consecuencia de la crisis económica mundial, están experimentando una tendencia a la baja, empujada por la disminución de la demanda, producto de los problemas que rodean a la UE [19] y que genera esa presión bajista.

Es obvio que la escalada de precios no tiene otro origen que en el aumento considerable de la demanda, y se ha evidenciado que con unos precios límite cómo los alcanzados en estos últimos años (que han llegado a alcanzar incrementos de orden 10 respecto a los primeros años de este siglo) y la desaceleración económica generada en el marco financiero actual, no cabía otra opción más que la reducción de los precios a corto plazo.

Según la OPEP, si los niveles de producción continúan, las oferta, superará a la demanda.

Por otro lado se evidencia cómo el auge del precio del petróleo en los últimos años no ha dañado la economía mundial tanto como en los años 70 y 80. Más allá del hecho de que el aumento actual del precio del petróleo no ha sido tan significativo en términos reales, las economías avanzadas en general han mejorado su eficiencia en el uso de la energía y actualmente utilizan menos energía para el mismo volumen de actividad económica. EEUU y Europa, por ejemplo, precisan del 50% de la energía que requerían en los años 70 para generar una unidad del PIB (una cifra que expresa la intensidad del uso del petróleo de estas economías). Los países avanzados, por los menos, han experimentado un cambio estructural en sus economías, con el sector de servicios, menos intensivo en energía, desplazando al sector industrial como motor central del crecimiento. Por otro lado, los países en vías de desarrollo han visto el peso de la industria crecer en sus economías y todavía no han experimentado la misma mejora en eficiencia energética respecto a su crecimiento.

Algo significativo es el hecho de que algunas empresas ya vieron reducidos sus ingresos anuales, previo a la crisis, por su sensibilidad ante las escalada de precios de los recursos energéticos, hecho que demostró y que demuestra, que una reducción de la demanda, genera esa corrección en los precios.

Es más que evidente que en un entorno económico desacelerado como el actual, la presión de los mercados ha generado la reducción del precio del crudo, pero también se ha evidenciado que la escalada de precios tiene techo, y que el consumo de petróleo disminuye en algunos sectores y se intensifica en otros emergentes, desmostrando que la dependencia es continua y seguirá siendolo. A largo plazo, el precio del crudo dependerá, por un lado, del crecimiento y eficiencia de los grandes países emergentes, como China e India, y, por otro, de la posible capacidad de progreso de la tecnología para aplazar el cenit de la producción mundial de petróleo, disminuir los costes de exploración y desarrollo o, posiblemente, de desarrollar alternativas al petróleo, factibles, sostenibles y con unos costes más atractivos.

Es por ello que se demuestra la necesidad de medidas tanto a nivel europeo como mundial que promuevan la eficiencia de uso de los recursos enérgeticos y el aumento de inversión para potenciar tanto las energías como los combustibles alternativos.

## **3.3.- Normativa de reducción de emisiones contaminantes**

### **3.3.1.- Introducción**

La demanda social de reducción del impacto de los motores de combustión interna en el medio ambiente ha forzado el desarrollo de tecnologías específicas para limitar la formación y emisión de productos contaminantes de los gases de escape.

Para conseguir estos objetivos de forma controlada, se han ido elaborando y activando sucesivas normativas y regulaciones que imponen valores límite de emisión cada vez más bajos. Estos límites son medidos en ensayos reglamentados siguiendo una metodología adecuada.

### **3.3.2.- El control de las emisiones**

El objetivo fijado en el Protocolo de Kyoto [20] fue el reducir las emisiones de una serie de gases de efecto invernadero en un 8 % durante el período 2008-2012 en relación con los niveles de 1990.

Las emisiones de dióxido de carbono procedentes del transporte han aumentado rápidamente en los últimos años, del 21% del total de emisiones en 1990 al 28% en el 2004. Sin embargo, en la actualidad no existen normas sobre el límite de emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión en los vehículos. Se considera que las emisiones de CO<sub>2</sub> originadas por el transporte en la Unión Europea actualmente constituyen el 3,5% de emisiones globales de CO<sub>2</sub>.

Es preciso remarcar, que entre 1992 y 2007 los gases nocivos con que los aviones contaminaban Europa aumentaron en un 89%, y es que el transporte aéreo es uno de los máximos responsables de la escalada de emisiones contaminantes que aceleran el cambio climático. Los turismos representan aproximadamente la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el transporte en la Unión Europea y el transporte aéreo representa el 12% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **3.3.3.- El desarrollo de medidas**

Los límites de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los vehículos estaban sujetos a un acuerdo voluntario (en esto difieren de los límites obligatorios en la legislación CAFE [21] de Estados Unidos) entre la UE y los fabricantes de automóviles. En última instancia, el objetivo de la Unión Europea con los acuerdos voluntarios era contribuir a llegar a un promedio de emisiones de CO<sub>2</sub> (que se miden de acuerdo a la Directiva de la Comisión 93/116/CE) de 120 g/km para todos los nuevos vehículos de turismo para el año 2012.

Sin embargo, como resultó cada vez más claro que el acuerdo inicial no se cumpliría (habiendo logrado sólo 160 g/km en 2005, desde los 186 g/km en 1995), los legisladores modificaron la reglamentación.

A finales de 2005, el Parlamento Europeo aprobó una resolución en apoyo a las obligatorias normas de emisión de CO<sub>2</sub> para sustituir a los actuales compromisos voluntarios de los fabricantes y al etiquetado.

A finales de 2006, en respuesta a un nuevo informe desarrollado por la Federación Europea de Transporte y Medio Ambiente [21] documentando falta de progreso en las metas de carácter voluntario, la Comisión Europea anunció que estaba trabajando en una propuesta para limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> de los automóviles.

El 7 de febrero de 2007, la Comisión Europea publicó su propuesta de proyecto legislativo (COM 2007 0019) para limitar la media de emisiones de CO<sub>2</sub> de la flota de vehículos europeos a los 120 g/km. Sin embargo, esto no quiere decir que todos los fabricantes tendrían una media de 120 g/km para sus vehículos. Algunos grandes fabricantes de automóviles pequeños, ya están muy cerca del objetivo, mientras que los fabricantes de pequeño volumen de ventas en automóviles pequeños producen automóviles con más emisiones por km, situándose más lejos de alcanzar ese objetivo. Obviamente estas medidas generan desacuerdos entre los sectores industriales de los diferentes países, dependiendo del tipo de vehículos que por tendencia producen.

La Federación Europea de Transporte y Medio Ambiente insistió en la necesidad de un objetivo a más largo plazo que disminuyera a la mitad el consumo de combustible de los automóviles nuevos durante la década de 2010, alcanzando los 80 g de CO<sub>2</sub>/km hacia el 2020. La media de emisiones de los vehículos nuevos producidos en la Unión Europea se redujo hasta los 160 g CO<sub>2</sub>/km (reduciendo sólo el 0.2% en 2006).

La Asociación de Fabricantes Europeos de Automóviles (ACEA) [22] solicitó ampliar el plazo al menos hasta 2015 y un enfoque diferente que permitiera a los constructores reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> con una viabilidad económica.

De igual manera, ACEA solicitó a los gobiernos de la Unión Europea el desarrollo de políticas que incentiven la demanda de vehículos con reducidas emisiones de CO<sub>2</sub>.

Al ver que los fabricantes no reducían voluntariamente las emisiones, la comisión europea decidió en 2009 obligar a una reducción de emisiones progresiva que persigue alcanzar los 95 g/km de media por coche fabricado por cada fabricante. Este valor se acerca a las emisiones medias de algunos fabricantes de vehículos de gama media-baja.

El porcentaje de vehículos de cada fabricante que deberán estar por debajo de la media irá creciendo progresivamente: 65% en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 y 100% a partir de 2015.

Si la media de emisiones de la flota fabricada por una empresa aumenta respecto a 2012 deberá pagar una penalización.

En 2020, el objetivo es que las emisiones sean de 95 g/km. A partir de 2013 se comenzará a debatir las medidas necesarias para ello.

### **3.3.3.1.- Medidas particulares**

Uno de los objetivos de la Directiva 1999/94/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 1999, relativa a la disponibilidad de información a los consumidores sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> en el ámbito de la comercialización de los turismos nuevos, es garantizar que la información pertinente y comparable sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los turismos nuevos, ofrecidos en venta o alquiler, en la Unión Europea se pone a disposición de los consumidores a fin de que sea el propio consumidor quien pueda elegir con conocimiento de causa, impulsando de ese modo a los fabricantes a hacer lo necesario para reducir el consumo de los automóviles.

Por poner un ejemplo, en Reino Unido, el planteamiento inicial se consideró ineficaz. La forma en que se presentó la información era demasiado complicada de entender para los consumidores.

Como resultado, los fabricantes de automóviles en el Reino Unido acordaron voluntariamente poner una etiqueta de color (más sencilla para el consumidor) que muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> en todos los vehículos nuevos a partir de septiembre de 2005, con una letra desde la A (menos de 100 g de CO<sub>2</sub> por km) a la F (más de 186 g/km).

El objetivo de la nueva "etiqueta verde" es dar a los consumidores una información clara sobre el rendimiento medioambiental de los diferentes vehículos.

Otros países miembros de la Unión Europea están también en proceso de introducir este tipo de etiquetas.

### **3.3.4.- Normativa de emisiones de la Unión Europea**

La Unión Europea ha ido desarrollando normativas respectivas a todo tipo de emisiones contaminantes cada cierto periodo de tiempo. Estas medidas son, obviamente, dependientes de los tipos de vehículos, variando los límites en función de la categoría de estos.

Las etapas son normalmente denominadas Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5 y Euro 6 para vehículos ligeros. Las series correspondientes de las normas para vehículos pesados utilizan números romanos en vez de números arábigos (Euro I, Euro II, etc.)

En estos cuadros se resumen, como se ha comentado en función de la categoría vehicular y el tipo de motor:

#### **3.3.4.1.- Normativa para turismos**

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>Diésel</b>						
Euro I†	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro II, IDI	Enero de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Enero de <sup>a</sup>	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	Enero de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V	Septiembre de 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI (propuesto)	Septiembre de 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005
<b>Gasolina</b>						
Euro I†	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro II	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro IV	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005 <sup>b</sup>
Euro VI (propuesto)	Septiembre de 2014	1.0	0.10	-	0.06	0.005

\* Antes de Euro V turismos > 2500 kg estaban clasificados en la categoría **Vehículo industrial ligero N1 - I**

**Tabla 2.** Normas europeas sobre emisiones para turismos (categoría M1), en g/km

### **3.3.4.2.- Normativa para vehículos industriales ligeros**

<b>Tipo</b>	<b>Fecha</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>
<b>Diésel</b>						
Euro I	Octubre de 1994	2.72	-	0.97	-	0.14
Euro II, IDI	Enero de 1998	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Enero de 1998	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	Enero de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V (propuesto)	Septiembre de 2010	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI (propuesto)	Septiembre de 2015	0.50	-	0.17	0.08	0.05
<b>Gasolina</b>						
Euro I	Octubre de 1994	2.72	-	0.97	-	-
Euro II	Enero de 1998	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro IV	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro V	Septiembre de 2010	1.0	0.075	-	0.06	0.005
Euro VI						

**Tabla 3.** Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros  $\leq$  a 1305 kg (categoría N1 - I), en g/km

<b>Tipo</b>	<b>Fecha</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>
<b>Diésel</b>						
Euro I	Octubre de 1994	5.17	-	1.4	-	0.19
Euro II, IDI	Enero de 1998	1.25	-	1.0	-	0.12
Euro II, DI	Enero de 1998	1.25	-	1.0	-	0.12
Euro III	Enero de 2001	0.80	-	0.72	0.65	0.07
Euro IV	Enero de 2006	0.63	-	0.39	0.33	0.04
Euro V	Septiembre de 2010	0.63	-	0.295	0.235	0.005
Euro VI	Septiembre de 2015	0.63	-	0.195	0.105	0.005
<b>Gasolina</b>						
Euro I	Octubre de 1994	5.17	-	1.4	-	-
Euro II	Enero de 1998	4.0	-	0.65	-	-
Euro III	Enero de 2001	4.17	0.25	-	0.18	-
Euro IV	Enero de 2006	1.81	0.13	-	0.10	-
Euro V	Septiembre de 2010	1.81	0.13	-	0.075	0.005
Euro VI						

**Tabla 4.** Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros 1305 kg-1760 kg (categoría N1 - II), en g/km

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>diésel</b>						
Euro I	Octubre de 1994	6.9	-	1.7	-	0.25
Euro II, IDI	Enero de 1998	1.5	-	1.2	-	0.17
Euro II, DI	Enero de 1998	1.5	-	1.6	-	0.20
Euro III	Enero de 2001	0.95	-	0.86	0.78	0.10
Euro IV	Enero de 2006	0.95	-	0.46	0.39	0.06
Euro V	Septiembre de 2010	0.74	-	0.3505	0.280	0.005
Euro VI	Septiembre de 2015	0.74	-	0.350	0.280	0.005
<b>Petrol (Gasoline)</b>						
Euro I	Octubre de 1994	6.9	-	1.7	-	-
Euro II	Enero de 1998	5.0	-	0.8	-	-
Euro III	Enero de 2001	5.22	0.29	-	0.21	-
Euro IV	Enero de 2006	2.27	0.16	-	0.11	-
Euro V	Septiembre de 2010	2.27	0.16	-	0.082	0.005
Euro VI						

**Tabla 5.** Normas europeas sobre emisiones para vehículos industriales ligeros 1760-3500 kg (categoría N1 - III), en g/km

### **3.3.4.3.- Normativa para vehículos pesados ( camiones y autobuses)**

Aunque para los turismos, las normas se definen en g/km, para los camiones se definen según la potencia del motor en g/kWh y por lo tanto no son comparables. La siguiente tabla contiene un resumen de las normas sobre emisiones y de sus fechas de aplicación. Las fechas de las tablas se refieren a nuevas homologaciones; las fechas de todas las homologaciones son en la mayoría de los casos un año después (las homologaciones de la UE son válidas durante más de un año).

El nombre oficial de la categoría es vehículo pesado de motores diésel, que en general incluye a camiones y autobuses.

Tipo	Fecha	Ciclo de ensayos	CO	HC	NOx	PM	Humo
			4.5	1.1	8.0	0.612	
Euro I	1992, < 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
	1992, > 85 kW		4.0	1.1	7.0	0.25	
Euro II	Oct. 1996	ECE R-49	4.0	1.1	7.0	0.15	
	Oct. 1998						
Euro III	Oct. 1999 Sólo EEVs	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15
	Oct. 2000		2.1	0.66	5.0	0.10 0.13*	0.8
Euro IV	Oct. 2005	ESC & ELR	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	Oct. 2008		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5

\* Para los motores de menos de 0.75 dm<sup>3</sup> de cilindrada por cilindro y una potencia nominal a velocidad mayor de 3000 rpm.  
EEV es "Enhanced environmentally friendly vehicle" ("vehículo ecológico avanzado").

**Tabla 6.** Normas europeas sobre emisiones para motores diésel HD, en g/kWh (Humo en m-1)

### **3.3.4.4.- Normativa para vehículos N2 y N3**

**Normas europeas sobre emisiones para la categoría, EDC, (2000 en adelante)**

Tipo	Fecha	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	1988-1992	12.30	15.8	2.60	none
Euro I	1992-1995	4.90	9.00	1.23	0.40
Euro II	1995-1999	4.00	7.00	1.10	0.15
Euro III	1999-2005	2.10	5.00	0.66	0.10
Euro IV	2005-2008	1.50	3.50	0.46	0.02
Euro V	2008-2012	1.50	2.00	0.46	0.02
Euro VI					

Tabla 7. Normas europeas sobre emisiones para la categoría EDC

**Normas europeas sobre emisiones para el ciclo (antiguo) ECE R49**

Tipo	Fecha	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	1988-1992	11.20	14.40	2.40	ninguno
Euro I	1992-1995	4.50	8.00	1.10	0.36
Euro II	1995-1999	4.00	7.00	1.10	0.15

Tabla 8. Normas europeas sobre emisiones para el ciclo (antiguo) ECE R49

El ciclo ECE R49 se trata de un ciclo de prueba dinámico, nótese que los vehículos ligeros se ensayan instalando el vehículo en un banco de rodillos y siguiendo un ensayo dinámico normalizado, mientras que los vehículos pesados, industriales, estacionarios y marinos pasan por ensayos estacionarios o dinámicos en bancos de pruebas

### **3.3.5.- Norma Euro 6**

Según los informes europeos la nueva norma sobre emisiones, Euro 6 entrará en aplicación según los Reglamentos estipulados:

- 1 de septiembre de 2014 para homologaciones nuevas
- 1 de septiembre de 2015 para nuevas matriculaciones.

Respecto a los motores de gasolina y derivados prácticamente no hay variación con respecto a la Euro 5, las principales restricciones se producen en los motores Diésel y son bastante acusadas.

En primer lugar Euro 6 establece que en estos la emisión máxima de NOx se reduzca de 180 a 80 mg/km recorrido.

La limitación en la emisión de monóxido de carbono (CO) y de partículas en suspensión se mantiene en 500 y 5 mg/ km, pero en cambio la mezcla combinada de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno queda limitada a 170 mg/km en lugar de 230 mg/km.

Con respecto a la norma análoga y referente a vehículos pesados ( Euro VI) se destacan las siguientes modificaciones:

- Nuevos ciclos transitorios y estacionarios que incluyen el arranque en frío.
- Reducción de las emisiones de NOx en un 80% respecto a la Euro V.
- Reducción de la masa de partículas en un 66% respecto a la norma anterior e introducción de un límite adicional respecto al número de partículas, que traduciría en una reducción total de las partículas superior al 95%.
- Introducción de un límite para las emisiones de amoniaco.
- Inclusión de las emisiones de gases de combustión del cárter si no se utiliza la recirculación de la aspiración de dichos gases.
- Mejora de los requisitos de duración en materia de emisiones hasta 700.000 Km o 7 años para vehículos con la masa de referencia más alta (más de 7.5 toneladas).
- Optimización del rendimiento del sistema de diagnósticos OBD (cuya función, comentaremos en apartados posteriores).

Con respecto al CO2 ni Euro 5 ni Euro 6 se establecen límites de emisiones y sin embargo desde 2009 han sido implantados, como ya se ha comentado anteriormente, por la Comisión Europea después de años de promover que las marcas de automóviles redujeran voluntariamente (y drásticamente) la cantidad de CO2 que emiten los vehículos.

Las cifras objetivo ya han sido analizadas anteriormente, pero como dato añadido se ha establecido, que con respecto a este año 2012 el 65 % de los vehículos matriculados de una marca en concreto deban emitir una cantidad de CO2 inferior a la media (aunque el Reglamento no clarifica demasiado cuál es esa media, parece ser que se refiere a la media de emisiones del parque automovilístico europeo). Ese porcentaje irá aumentando hasta el 75% en 2013, el 80% en 2014 y alcanzará el 100% en 2015.

## **4. Los MACI**

### **4.1.- Evolución histórica de los MACI**

Desde siempre la primera energía mecánica utilizada por el hombre ha tenido el origen en su propia energía muscular, incrementada a través de mecanismos simples como la palanca y la polea. Otro paso importante en la obtención de la energía necesaria para realizar las labores más extenuantes consistió en la domesticación de los animales para la sustitución de la energía humana por la animal, en general más potente.

A lo largo de los años la mejora progresiva de diversos aparejos permitió ir incrementando la capacidad de tiro de los animales. La importancia del aprovechamiento de la energía de los animales en la sustitución de tareas de los hombres se comprende fácilmente teniendo en cuenta que aún hoy en día se sigue utilizando. Un paso importante ha sido el aprovechamiento de las energías potenciales de la naturaleza como la hidráulica y la eólica, que eran las más fácilmente detectables por el hombre. Así, las primeras ruedas hidráulicas, precursoras de las actuales turbinas, constituyeron las primeras actividades de producción en serie en las que se utilizó maquinaria.

El uso de la energía hidráulica pasó de los molinos de grano a las demás actividades industriales, hasta tal punto que la revolución industrial se inició en un momento en el que las máquinas hidráulicas, sobre todo motores, estaban muy extendidas. De hecho, como lo veremos luego, los primeros motores de vapor se usaron en muchas ocasiones para bombear agua y mover ruedas hidráulicas. Respecto a la energía eólica aparte de su uso convencional para mover barcos, comenzó a utilizarse más tarde que la hidráulica con fines industriales.

Tanto la energía hidráulica como la eólica tienen el inconveniente de ser fuentes de energía de carácter estacional cuya utilización está limitada a la presencia de saltos de agua y a la relativa constancia de la velocidad y dirección del viento, respectivamente. La aparición de las primeras máquinas de vapor potenció y aceleró el gran desarrollo tecnológico que dio lugar a la revolución industrial a principios del siglo XVIII.

## LAS MÁQUINAS DE FUEGO

La obtención de energía mecánica a partir de la combustión de combustibles se produjo antes del desarrollo de las bases termodinámicas (siglo XIX). Así, el aparato más antiguo de obtención de energía mecánica a partir del estado térmico proporcionado por el fuego data del siglo I antes de Cristo y está descrito en los escritos de Herón de Alejandría.

El aparato que posteriormente recibiría el nombre de “eolípila”, consiste en una esfera giratoria hueca provista de unos codos acodados diametralmente opuestos y orientados en sentidos opuestos que era alimentada con vapor procedente de calentar agua con fuego. El vapor entraba en la esfera a través de unos soportes huecos y al circular por los codos acodados hacía girar la esfera (Imagen 5). Este dispositivo usado, posteriormente en el antiguo Egipto con fines litúrgicos, constituye el primer antecedente de las turbinas de vapor modernas, aunque el principio de reacción pura por el que trabaja no se aplica a ninguna de las turbinas existentes actualmente.

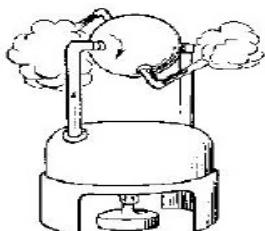


Imagen 5. Eolípila o primera turbina de reacción pura que se conoce en la historia. Siglo I a.C.

No se conocen más antecedentes serios de construcción de máquinas térmicas hasta finales del siglo XVII, en 1678, cuando el francés Abbé Jean de Hautefeuille, a quien la historia ha acreditado con el origen del motor de combustión con pistón, propuso usar la capacidad explosiva de la pólvora en un cilindro para mover un pistón y obtener trabajo. Sin embargo, fue solo hasta 1680 cuando los Franceses Huygens y Papin lograron construir un motor de este tipo. La falta de control en la explosión, y particularmente la dificultad de cargar el cilindro con el combustible sólido entre cada carrera de trabajo, frenó el desarrollo de este motor excepto para algunas aplicaciones específicas como ciertos tipos de catapultas.

En la Imagen 6 se ve un esquema. Cuando el pistón terminaba su carrera ascendente descubría unas lumbreiras por las que se escapaban los gases calientes y al enfriarse el gas residual (generación de vacío), junto con la presión atmosférica, actuando sobre la cara opuesta del pistón empujaban a éste hacia abajo realizando la carrera de trabajo.

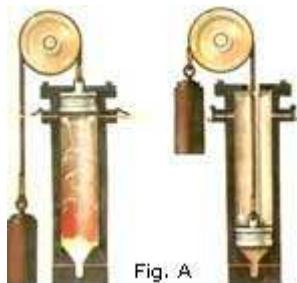


Imagen 6. El motor de Huygens

## VACÍO A PARTIR DE LA CONDENSACIÓN DE VAPOR

El francés Denis Papin, ayudante de Huygens, tuvo la clarividencia de usar la condensación del vapor de agua como mecanismo para producir vacío en el interior del cilindro, proporcionando así el fundamento para la construcción de la máquina de vapor de Newcomen.

El motor de vapor de Papin (1690) consistía en un cilindro vertical en el que se situaba un pistón asociado a una barra. En el fondo del cilindro se ponía agua, la cual se calentaba generándose vapor. La expansión del vapor elevaba el pistón hasta el final de su carrera, donde se fijaba. En ese momento se refrigeraba el cilindro, con lo que se producía la condensación del vapor, haciendo vacío. Posteriormente se liberaba manualmente el pistón, el cual realizaba la carrera descendente de trabajo por acción de la presión atmosférica, al igual que en el motor de pólvora de Huygens.

La idea de Papin fue poco practicable, ya que el cilindro tenía la triple función de caldera, condensador y mecanismo transmisor de potencia. Hay que señalar que, aunque Papin fue el primero en aplicar la creación de vacío por condensación de vapor a la obtención de potencia mecánica, en 1606 Giovanni Battista della Portaya había descrito antes este fenómeno, prediciendo sus posibles aplicaciones.

En 1698, los trabajos en las minas de estaño de Cornish fueron obstaculizados por la presencia del agua. Con el objetivo de extraer el agua, Thomas Savery diseñó y construyó un motor sin pistón al que llamó “The Friend Miner’s” (El Amigo del Minero). Un esquema de este motor puede observarse en la Imagen 7. El motor de Savery extraía agua de un pozo a través de una tubería conectada a una cámara que admitía vapor de una caldera. Al refrigerar dicha cámara la condensación del vapor provocaba un vacío que elevaba un volumen de agua que quedaba atrapado por encima de una válvula antirretorno.

En ese momento se readmitía vapor a la cámara y la presión del mismo forzaba dicho volumen de agua hacia arriba pasando por una segunda válvula antirretorno. Hay que señalar que las válvulas de admisión de vapor a la cámara y de agua de refrigeración para provocar la condensación eran manuales. Además, la altura a la que podía elevarse el agua era muy dependiente de la presión del vapor en la caldera. Se cree que el motor de Savery alcanzaba los cinco ciclos por minuto y que su rendimiento térmico era muy inferior al 0.5%.

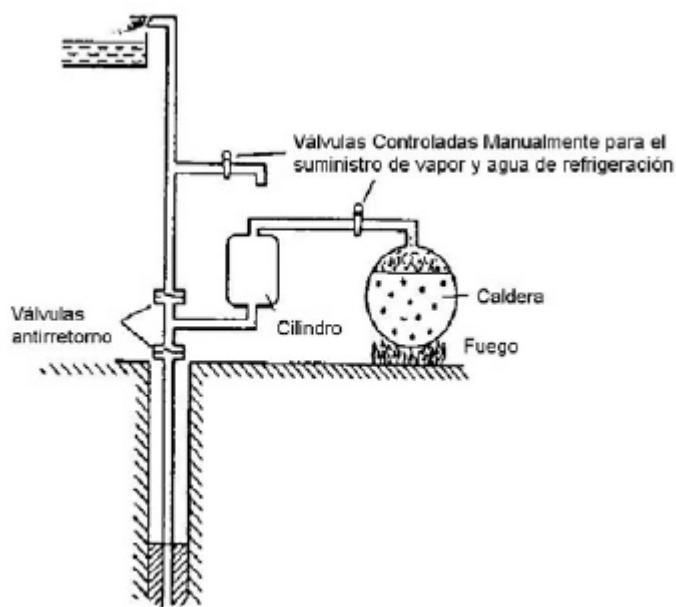


Imagen 7. . Esquema del motor de Savery

A pesar de las limitaciones que tenía, el motor de Savery tuvo un breve éxito comercial hasta la aparición en 1712 de la primera máquina de vapor construida por Newcomen.

Uno de los inventos que ha influido de forma más decisiva en la historia de la humanidad es, sin duda, la máquina de vapor, desarrollada por el herrero de profesión, Thomas Newcomen a principios del siglo XVIII. El papel trascendental que ha desarrollado este motor térmico lo indica el hecho de que fue el único utilizado por el hombre durante aproximadamente 150 años. Una de las más importantes mejoras de la máquina de vapor construida por Newcomen, ayudado por John Calley, fue la idea de provocar la condensación del vapor inyectando agua pulverizada en el interior del cilindro. Se cuenta que una fuga accidental de agua hacia el interior del cilindro a través de un poro produjo una condensación tan rápida del vapor que el pistón rompió la cadena que la unía a un balancín, así como el fondo del cilindro y la parte superior de la caldera. Este accidente providencial condujo al descubrimiento de la condensación por mezcla.

En la máquina de vapor de Newcomen (Imagen 8), el vapor, generado en una caldera situada bajo el cilindro de potencia, se introducía en el cilindro, elevando el pistón hasta su máxima altura vertical. En este momento, se provocaba la condensación del vapor mediante una inyección de agua fría en el interior del cilindro, de modo que por la acción de la presión atmosférica aplicada en la otra cara del pistón (de ahí el nombre de motor atmosférico), esterealizaba la carrera descendente de trabajo.



Imagen 8. Esquema de la máquina de vapor de Thomas Newcomen

Entre las innovaciones introducidas en la máquina de vapor de Newcomen cabe destacar las siguientes:

- Empleo del balancín para transmitir el movimiento lineal del pistón.
- Válvulas accionadas automáticamente desde el balancín.
- Válvula para expulsar el aire del interior del cilindro.
- Empleo de segmentos anillos de cuero, sobre los que se mantenía un cierto nivel de agua, para asegurar el sellado entre el cilindro y el pistón. Este dispositivo constituye el primer cierre hidráulico de la historia de la tecnología. Las prestaciones de la máquina de vapor de Newcomen se aproximaban a las siguientes:
  - 16 carreras de trabajo por minuto
  - 6 caballos de vapor de potencia
  - Rendimiento térmico cercano al 0,5% .Las mejoras introducidas por Smeaton alrededor de 1768 aumentaron el valor del rendimiento de la máquina de vapor hasta un 1%.

En esta época, su funcionamiento era ya muy fiable, por lo que, sólo en Inglaterra se construyeron aproximadamente 200 unidades. Fueron, sin embargo, las mejoras introducidas por el escocés James Watt, el cual, trabajando en la Universidad de Glasgow [23], intervino en la reparación de un modelo reducido de máquina de vapor. El interés que despertó en él este motor provocó que dedicase el resto de su vida a su mejora y construcción. Quizás la mejora más sustancial que introdujo Watt en la máquina de Newcomen fue la invención del condensador separado (Imagen 9).

Al hacer esto se conseguía eliminar el proceso repetitivo de recalentar el cilindro en cada ciclo. Se puede decir que esta mejora elevó por sí misma el rendimiento al doble del logrado por Smeaton y a cuatro veces el original de Newcomen. La invención del condensador separado proporcionó a Watt una patente en 1769, cuya duración fue extendida en 1775 hasta el año 1800. Fechas entre las cuales renunció con Mathew Boulton lograron poner en operación cerca de 500 motores.

El título de la patente de Watt fue: “Método para reducir el consumo de vapor y combustible de las máquinas de fuego”.

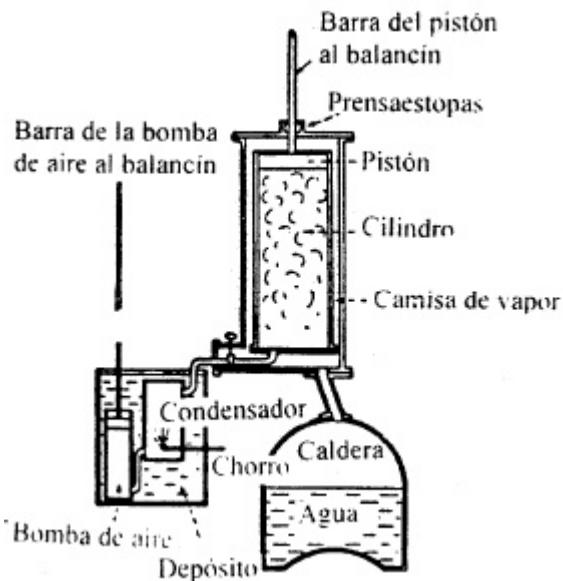


Imagen 9. Esquema de la máquina de vapor de James Watt

Otras contribuciones de Watt al desarrollo de la máquina de vapor fueron:

- El regulador de bolas para controlar la velocidad de la máquina
- El uso de instrumentos para medir presiones máxima y mínima en el interior del cilindro, lo cuál condujo al desarrollo posterior de un instrumento para medir la presión instantánea en el interior del cilindro (diagrama del indicador), llamado indicador por parte de su ayudante John Southern.
- La primera definición de una unidad precisa de potencia, que fue llamada “horsepower”, definida como la potencia necesaria para levantar 33.000 libras a un pie de altura durante un minuto. El uso de la máquina de vapor se popularizó tanto que llegó a ser empleada en la navegación hacia 1807 por R. Fulton mas tarde, en 1825.

Stephenson la usó para accionar una locomotora. En la Imagen 10 se observa una máquina de vapor empleada en el banco de España para estampación de moneda. Esta máquina fue donada a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid [24] y se encuentra actualmente en el salón principal del edificio como pieza de museo. La aparición de la turbina de vapor a finales del siglo XIX desplazó a la máquina de vapor del campo de las grandes potencias, aunque ésta siguió utilizándose en aplicaciones con grados de carga y regímenes variables.

Sin embargo, fue la aparición de los motores de combustión interna alternativos el hecho que constituyó el principio del fin de la máquina de vapor, que desapareció prácticamente del mercado a mediados del siglo actual.

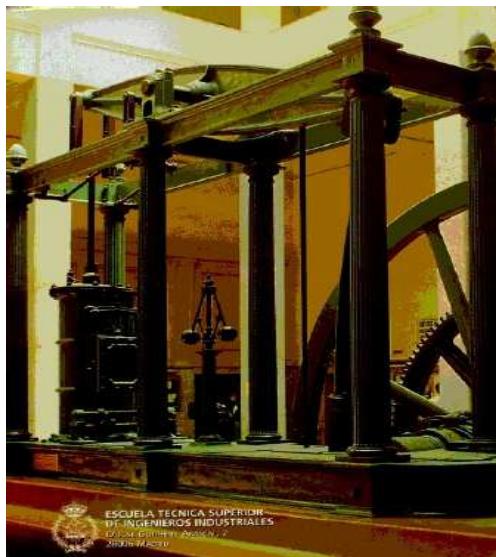


Imagen 10 .Máquina de vapor ubicada como pieza de museo en la ETSII de Madrid

## MOTORES DE AIRE CALIENTE

A pesar del éxito logrado con el desarrollo de la máquina de vapor, hubo algunos intentos de emplear el aire en vez del vapor como fluido de trabajo para, siguiendo principios similares, desarrollar lo que se ha dado en llamar motores de aire caliente.

Así en 1759, en pleno apogeo de la máquina de Newcomen, H. Wood describía una patente en la cuál decía que se podía introducir aire caliente a presión desde un horno en un cilindro y, después de enfriarlo, dejar que la presión atmosférica empujara el pistón realizando la carrera de trabajo. Aunque el señor Wood nunca logró fabricar uno de estos motores, si logró sentar las bases para la posterior aparición de los motores de aire caliente, que básicamente, reflejaron sus ideas. No fue hasta 1816 cuando Robert Stirling patentó un motor de aire que constituye uno de los más brillantes inventos de la historia de los motores térmicos (Imagen 11). Su diseño es aún más sorprendente si se tiene en cuenta que en esa época había todavía un conocimiento muy limitado de la naturaleza del calor y de su relación con el trabajo.

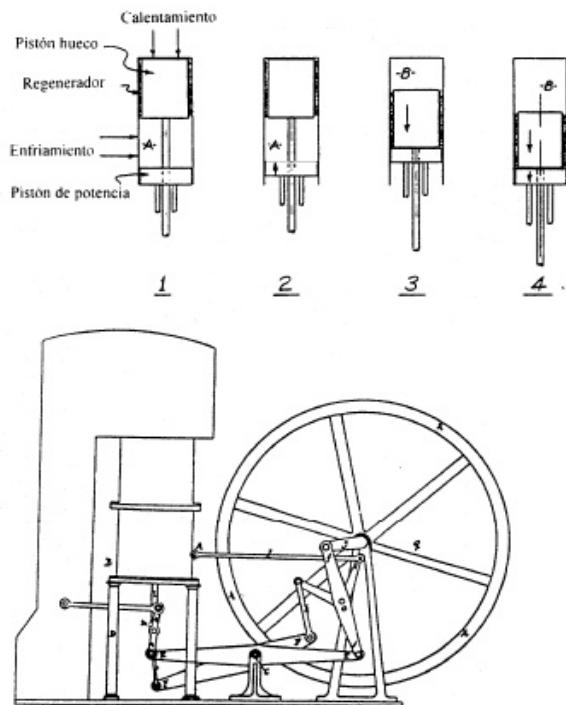


Imagen 11. Esquema del motor Stirling y funcionamiento básico del motor

El motor de Stirling emplea un ciclo cerrado con combustión externa. El funcionamiento se puede observar siguiendo el esquema de la Imagen 11 .

Así, el ciclo comienza cuando el pistón de potencia está en la parte inferior y el pistón hueco al que se acopla a un regenerador en la posición superior. En este momento todo el aire está contenido en la cámara A entre ambos pistones. Posteriormente, el pistón de potencia es elevado por la inercia del motor, comprimiéndose el aire de la cámara A y forzándolo a pasar por la superficie del regenerador, que se mantiene en la posición superior.

El aire al pasar por el regenerador se calienta, entrando en la cámara B donde se calienta de nuevo al entrar en contacto con las paredes superiores del cilindro expuestas al calor procedente de un horno. Gracias a este calentamiento el aire se expande en la cámara B y mueve el pistón con el regenerador hacia abajo, sin embargo, sigue pasando aire de la cámara A hacia la B, ya que el pistón de potencia sigue su carrera ascendente, hasta que ambos pistones se juntan en la posición superior del pistón de potencia.

Con todo el aire contenido ahora en la cámara B, se produce la expansión del mismo, empujando hacia abajo ambos pistones hacia la posición inferior. En este momento, el pistón con el regenerador es elevado por la inercia del motor, mientras el pistón de potencia permanece quieto. El regenerador, que se ha refrigerado al proporcionar calor al aire que ha pasado a su través, absorbe calor del aire contenido en la cámara B que es forzado a pasar hacia abajo a través de él. De este modo el regenerador se vuelve a calentar y el aire se enfriá al entrar en la cámara A, iniciándose un nuevo ciclo.

Los motores de aire caliente se dejaron de fabricar a principios del siglo actual, eclipsados por los motores de combustión interna alternativos. Sin embargo, los avances en metalurgia y en la tecnología de transmisión de calor han revitalizado el interés en el motor de Stirling, debido principalmente a sus bajas emisiones contaminantes y bajo ruido. Así, no se puede descartar que, en el futuro, este motor pueda suponer una cierta competencia para los actuales.

## **DEL CALÓRICO A LA TERMODINÁMICA**

Se puede dar por sentado que la máquina de vapor alcanzó un elevado nivel de desarrollo sin que se conociera claramente la naturaleza de los procesos termodinámicos que tenían lugar en su interior. Así, en el momento de aparición de la máquina de vapor no se sabía que el calor era una forma de transporte de energía y que el trabajo era su equivalente mecánico.

Fue en 1765 cuando J. Black explicó la naturaleza del calor usando su teoría del calórico, según la cuál el calor (calórico) era un fluido elástico contenido en los cuerpos de cuya densidad dependía la temperatura de los mismos. Según dicha teoría, el calórico tenía poco o ningún peso y se extraía de los cuerpos por fricción y por aplicación de fuego. La teoría del calórico permitía explicar los fenómenos de origen térmico conocidos hasta esa época, sin embargo pronto comenzó a tener detractores.

Así, en 1798, el estadounidense B.Thompson, conde Rumford, a través de sus experimentos con el sistema de taladro enfriado con agua utilizado en la fabricación de cañones se convenció de que el calor no era una sustancia. Esta afirmación se basaba en el hecho de que, no importaba el tiempo que el taladro estuviera trabajando en el cañón, siempre se seguía produciendo liberación de calor o, lo que es lo mismo, nunca se agotaba el calórico.

Sin embargo, no fue hasta muy entrado el siglo XIV cuando se logró rebatir completamente la teoría del Calórico.

Se puede decir que la ciencia que explica los procesos que ocurren en los motores térmicos, la termodinámica, se encuentra en los pensamientos del ingeniero militar francés Nicholas Leonard Sadi Carnot, publicados en 1824 con el título de “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas a recibir esta potencia”. De esta manera, y hacia finales de 1860, con la aportación de grandes genios de la historia, se logra plantear la termodinámica como cuerpo de doctrina.

## EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

Como se mencionó antes, la historia acredita al francés Abbé Jean de Hautefeuille como el hombre que primero concibió la idea del motor de combustión con pistones, debido a que en 1678 propuso usar pólvora en un cilindro para mover un pistón y obtener trabajo. Un par de años más tarde los franceses Huygens y Papin construirían un motor de este tipo, pero de aquí en adelante y durante más de 100 años, hasta 1794, con el motor desarrollado por Street en Inglaterra (ver Imagen 12 ) no se volvería a hablar de otra cosa que fueran las máquinas de vapor.

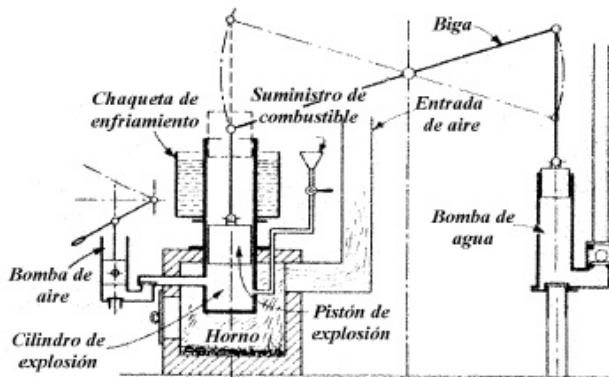


Imagen 12 . Motor de Street (1794)

En este motor, el aire se inducía al cilindro bombeándolo con la mano, haciendo que el pistón subiera un poco. Luego se inyectaba combustible líquido y se producía el encendido debido al calentamiento de la parte inferior del cilindro ubicado en un horno.

La combustión y expansión de los gases forzaban el pistón hacia arriba y realizaba trabajo, no solamente para elevar el pesado pistón, sino también para bombear agua a una elevación superior. La parte superior del cilindro estaba rodeado de una chaqueta de agua para refrigerar los gases de combustión y producir así un vacío parcial, el cuál, combinado con el efecto de la gravedad, hacían que el pistón se impulsara hacia abajo y elevara el agua desde el pozo.

32 años más tarde, en 1826, el inglés Samuel Brown era acreditado como el inventor del motor de vacío. Usaba un gran tanque lleno de aire dentro del cual inyectaba combustible gaseoso. El encendido de la mezcla producía una llama que forzaba el aire hacia fuera del tanque. La válvula de escape del tanque se cerraba cuando la presión disminuía hasta la atmosférica, y en ese momento inyectaba un chorro de agua dentro de los gases calientes provocando un enfriamiento rápido de los gases y obteniendo un vacío parcial en el tanque.

Una cara del pistón estaba sometida a la presión atmosférica y la otra al interior del tanque, de tal forma que la diferencia de presiones unidas al peso de éste, generaban la fuerza para mover el pistón y realizar trabajo. El 13 de mayo de 1854 los Padres Eugenio Barsanti y Felix Matteucci patentaban en Inglaterra su método de “obtención de potencia motriz por explosión de gases”.

En la Imagen 13 muestra el pistón y la biela descendiendo debido al efecto del enfriamiento de gases, al peso del pistón y a la presión atmosférica hasta que la cara superior del pistón descubre el puerto superior en la parte inferior izquierda del cilindro.

Esto obliga a pasar los gases de combustión hacia la parte superior del pistón. La parte superior del cilindro está abierto a la atmósfera, de tal forma que los productos de combustión se mezclan con el aire inducido dentro del cilindro durante la carrera de bajada del pistón. La aplicación de la patente requiere del uso de dos cilindros, así que la bajada del segundo pistón inicia la subida del primero y el aire es inducido a través del puerto empleado para escape. Se inyecta hidrógeno a través de una válvula ubicada en la parte inferior derecha del cilindro. El movimiento del mecanismo de esta válvula produce una chispa selectiva, la cuál enciende los gases. El pistón y la biela eran libres durante la carrera de subida, pero realizaban trabajo en la carrera descendente.

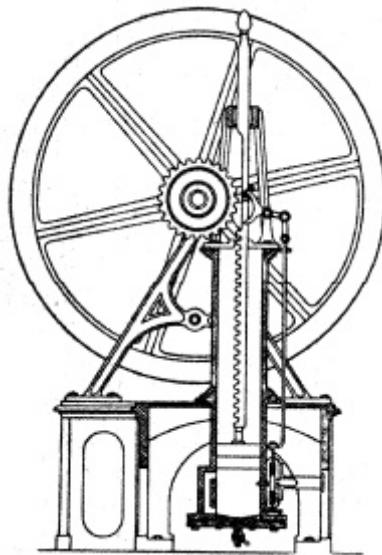


Imagen 13. Vista parcial del motor de pistón libre de Barsanti y Matteucci

### El motor de Lenoir.

En 1860 el francés Étienne Lenoir desarrolló el motor de gas sin compresión fuertemente inspirado en las máquinas de vapor de la época. Se usaba una mezcla aire y gas de hulla que se quemaba a presión atmosférica. La mezcla aire – gas se admitía durante parte de la carrera de admisión a través de una válvula de corredera, cuya apertura era controlada por un sistema de varillas movido desde el cigüeñal.

Cuando el pistón había realizado aproximadamente la mitad de la carrera, las válvulas se cerraban y, poco después, saltaba una chispa, originada por una bujía, lo que inflamaba la mezcla elevando la presión y transmitiendo potencia al pistón durante la segunda mitad de la carrera. En la carrera de regreso se descargaban los gases del cilindro. La eficiencia de este motor era baja debido a lo corta que era la carrera de expansión y a la ausencia de compresión previa de la mezcla. Pese a esto, se construyeron cerca de 500 motores de este tipo en Francia e Inglaterra.

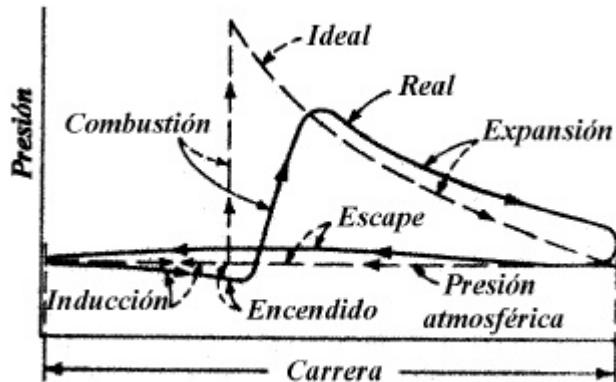


Imagen 14. Diagrama presión – volumen del motor de Lenoir

En 1866 los alemanes Otto y Langen construyen una versión mejorada del motor de Barsanti y Matteucci, incluyendo además las mejoras del motor de Lenoir como la válvula de corredera y el encendido provocado de la mezcla. El motor Otto-Langen, como se llamó después, empleaba un volante de inercia para subir el pistón desde la posición inferior e inducir carga fresca. Este motor aprovechaba el incremento de presión por la combustión de la mezcla al principio de la carrera de subida de un pistón libre para acelerar dicho pistón, que estaba solidario a una cremallera.

La subida rápida del pistón libre, que tenía una inercia considerable, producía la formación de vacío en el interior del cilindro. Posteriormente, con la cremallera del pistón engranada al cigüeñal, la presión atmosférica empujaba al pistón en su carrera descendente, que era la que proporcionaba trabajo al pistón. Por otra parte la válvula de corredera controlaba los procesos de admisión, escape y encendido de la mezcla mediante una llama de gas. Se construyeron cerca de 5000 motores que tenían las siguientes características:

- Potencia nominal: entre 0,25 y 3CV
- Régimen de giro: entre 90 y 110r pm
- Rendimiento térmico: entre 8% y 11,2 %

## **Principios de Beau de Rochas**

En Francia, en 1862, Beau de Rochas sentaba los cuatro principios fundamentales para ahorro de combustible en un motor de combustión a pistones:

1. Relación superficie - volumen lo más pequeña posible para el cilindro.
2. Proceso de expansión lo más rápido posible.
3. Expansión lo máxima posible.
4. Máxima presión posible al inicio del proceso de expansión. Las primeras dos condiciones van encaminadas a reducir al mínimo las pérdidas de calor, permitiendo así que toda la energía disponible en los gases de escape se transforme en trabajo

.La tercera condición prevé la expansión de los gases hasta el máximo, de tal manera que se obtenga el máximo trabajo de la expansión. La cuarta condición reconoce el hecho de que entre más alta sea la presión inicial, mayor es la presión a través de la carrera para una relación de expansión dada y hace posible mayores relaciones de expansión, resultado ambas en más trabajo.

Beau de Rochas, también indicó el método de operación deseado para el motor de combustión interna a pistón:

1. Admisión durante la carrera de bajada del pistón.
2. Compresión durante la subida del pistón.
3. Encendido de la carga en las cercanías del punto muerto superior, seguida por una expansión durante la carrera de bajada del pistón.
4. Escape durante la siguiente carrera de subida del pistón.

Han transcurrido cerca de 140 años y los principios siguen siendo prácticamente los mismos, únicamente se han variado los tiempos de aperturas y cierres de válvulas con el fin de incrementar las velocidades y las potencias.

### El motor de Brayton

En 1873, el estadounidense Brayton, desarrolló un motor que tenía las características de proceso de combustión a presión constante y expansión completa. Se usaba un cilindro para comprimir aire o la mezcla aire – combustible; el otro cilindro se usaba como un cilindro de trabajo y era lo suficientemente grande para obtener la expansión completa hasta presión atmosférica.

El compresor descargaba la mezcla a una cámara, y la mezcla fluía luego de ésta al motor, siendo encendida y quemada a presión constante a medida que entraba al motor (ver Imagen 15).

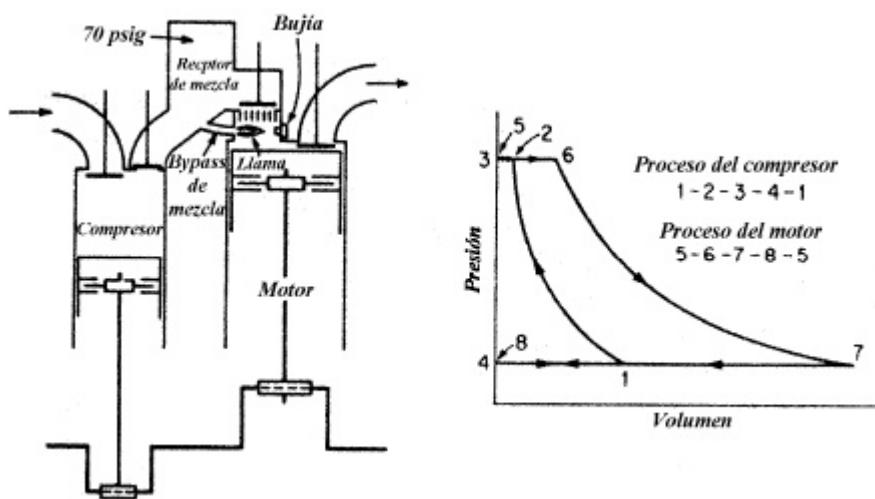


Imagen 15. Esquema del motor de Brayton y representación en el P – V del proceso ideal

Se mantenía una llama para el encendido de la mezcla mediante un bypass desde la cámara, y como medida de seguridad, para evitar la retro llama a la cámara se ponía una malla. El motor de Brayton, aunque construido relativamente en gran número, no representó una competencia considerable con el motor de pistón libre de Otto-Langen debido principalmente a su bajo rendimiento por las elevadas pérdidas de calor y de fricción.

Posteriormente éste se abandonó completamente a favor del proceso de Beau de Rochas cuando el motor de Otto penetró en el mercado estadounidense.

Teóricamente el ciclo de Otto y el de Brayton deberían tener el mismo rendimiento térmico. Aunque el proceso de Brayton fue desecharado para su aplicación en motores de pistones, fue sin embargo usado como proceso para las turbinas de gas y por esta razón a veces se dice que éstas trabajan según el ciclo de Brayton.

## EL MOTOR OTTO

A pesar de todos los diseños de motores de combustión interna alternativos descritos hasta ahora, la máquina de vapor era aún el motor más utilizado. Sin embargo, esta situación cambió rotundamente en el año 1876, cuando el alemán Nikolaus August Otto (ver Imagen 16) construyó el primer motor de cuatro tiempos de la historia basado en los principios de Beau de Rochas. Este motor ingresaría al banco depatentes con el número 365,701.

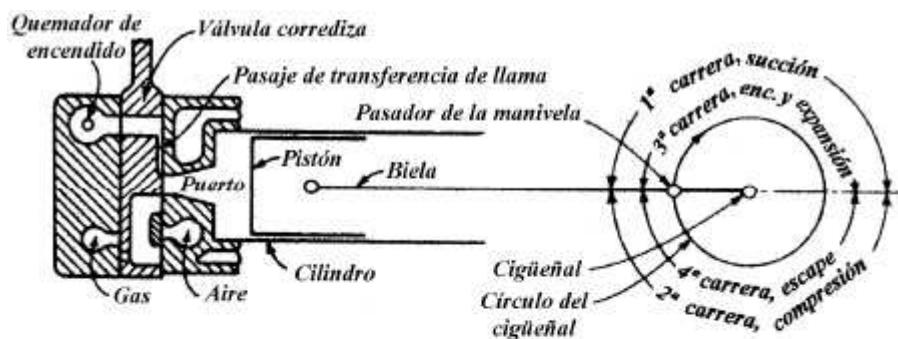


Imagen 16 . Nikolaus August Otto y principio de operación del motor de gas de Otto

A pesar de que la patente de Otto fue invalidada en Alemania porque se basaba en los principios de Beau de Rochas, nadie acusó a éste de haber copiado, sino que simplemente se pensó que a Otto se le había ocurrido el ciclo de cuatro tiempos 14 años después que a Beau de Rochas. Las repercusiones de este litigio llegan hasta nuestros días, ya que el ciclo de cuatro tiempos se conoce en Francia como ciclo de Beau de Rochas, mientras que, prácticamente en el resto del mundo, se le llama ciclo Otto.

En 1885 se implementaron en el motor de Otto dos mejoras significativas: el sistema de encendido eléctrico de la mezcla por magneto (diseñado por Otto) y el carburador de superficie para vaporizar el combustible líquido. Ya para 1890, se habían vendido cerca de 50.000 de estos motores en Europa y Estados Unidos.

## **EL MOTOR DE DOS TIEMPOS**

De las cuatro carreras descritas en los principios de Beau de Rochas, solamente en una se obtenía trabajo (expansión). Esto es lo mismo que decir que de las dos revoluciones que tiene que dar el motor, solamente en una de ellas se logra suministrar potencia al cigüeñal (carrera de potencia). Era deseable pues, lograr obtener en una sola revolución las cuatro carreras antes mencionadas. Este principio llevó al desarrollo del motor de dos tiempos. A pesar de intentos previos, fue realmente el inglés Clerk quien en 1878 logró construir el primer motor de dos tiempos de la historia.

Como se puede ver en la Imagen 17, el motor consistía en dos cilindros separados. El más pequeño contenía un pistón que bombeaba carga fresca al cilindro mayor, desplazando ésta los productos de la carga previa que se escapaba a través de puertos en las paredes del cilindro. Los motores de dos tiempos de compresión en carcasa (o en cárter) se usan más comúnmente debido a su bajo costo y pequeño tamaño especialmente en motores de fuera de borda y en motocicletas. Los motores de dos tiempos con soplador de barrido independiente se emplean en motores grandes para trabajo pesado. En la actualidad los primeros tienden a desaparecer del mercado por su excesiva descarga de emisiones contaminantes a la atmósfera.

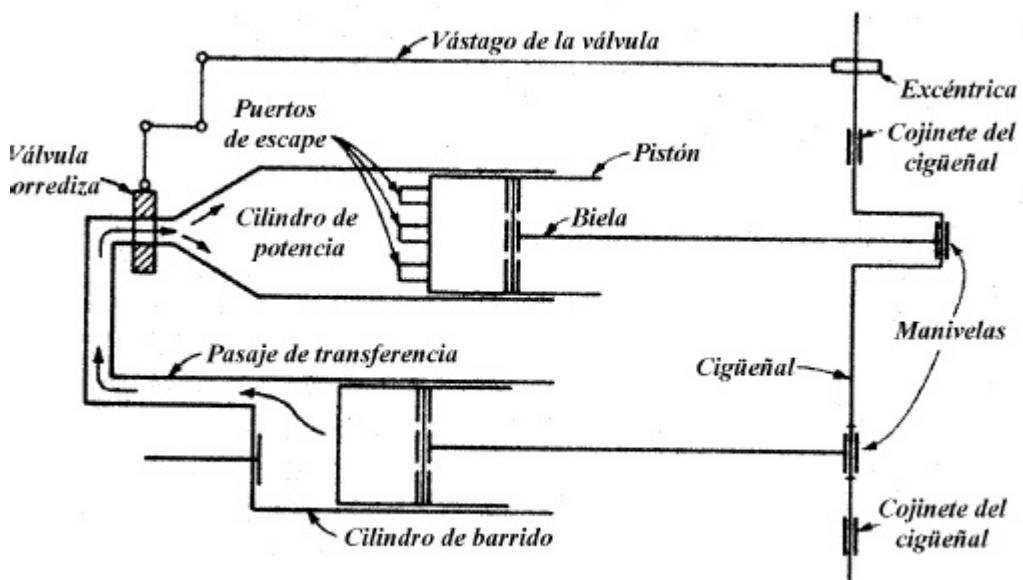


Imagen 17. Motor de dos tiempos de Clerk (1878)

## EL MOTOR DIESEL

En 1892 el alemán Rudolf Diesel, (ver Imagen 18) basado en que el trabajo de compresión rápida en un medio incrementa su energía interna y su temperatura, propuso comprimir sólo aire hasta que alcanzara una temperatura lo suficientemente elevada para que lograra encender el combustible que se inyectaría hacia el final de la carrera de compresión. Propuso, igualmente, coordinar el ritmo (o la tasa) de inyección de combustible con el movimiento del pistón de tal forma que el calor de la combustión fuera liberado a una temperatura máxima constante.

De esta forma, el proceso original fue concebido lo más cercano posible al ciclo de motor de Carnot. Sin embargo, razones económicas llevaron a que el proceso se realizara como una aproximación a un proceso de combustión a presión constante para motores Diesel grandes de baja velocidad.

Así pues, Diesel recibiría el 16 de julio de 1895 en los Estados Unidos la patente número 542.846 por este diseño, usando carbón pulverizado. Esta patente igualmente incluía el sistema de inyección de combustible líquido en el cual una bomba suministraba la cantidad de combustible deseado mediante una válvula de aguja y aire a presión arrastraba el combustible dentro del cilindro

El motor Diesel admite y comprime hasta un instante antes de iniciarse la inyección del combustible, únicamente aire, lo que le permitió tener relaciones de compresión mucho más elevadas que las de todos los motores de la época (los cuales presentaban problemas de detonación de la premezcla aire - combustible al interior de la cámara de combustión, debido a las características propias del combustible que empleaban) y, por tanto, se pudo obtener un rendimiento más elevado y un menor consumo de combustible. El primer motor experimental de Diesel se construyó en 1893, pero nunca llegó a funcionar. Después de superar algunos problemas, el primer motor operativo se construyó en 1897 (Imagen 19). Este motor proporcionaba 17,8CV a 154 rpm con un rendimiento del 26,2 %, valor muy elevado para aquella época.



Imagen 18. Rudolf Diesel (1892)

En la Imagen 19 se puede observar a Rudolf Diesel con sus ayudantes, en su taller de Augsburg (Alemania) preparando sus experimentos.

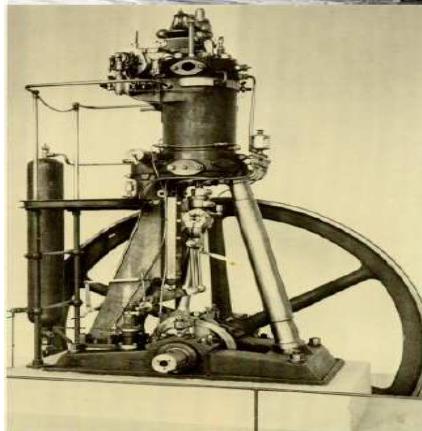


Imagen 19. Primer motor operativo de Diesel y taller en Augsburg, donde R. Diesel realizaba sus experimentos

En la Imagen 20 se observa la primera planta de generación eléctrica a gran escala con motores Diesel instalada en Kiev (Rusia) en el año 1904.

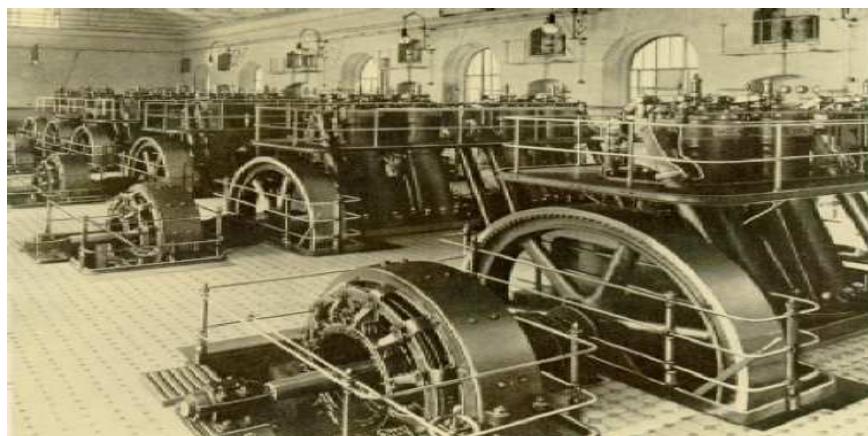


Imagen 20 . Planta de generación eléctrica empleando motores Diesel. Kiev (Rusia) 1904

Se puede afirmar que después de la aparición del motor Diesel se completó el desarrollo básico de los motores de combustión interna alternativos con respecto a su concepción mecánica.

El diseño de estos motores durante el siglo actual ha estado marcado por la mejora de prestaciones (potencia y rendimiento – consumo, sobre todo), conseguida en gran parte por el importante desarrollo de los combustibles, sobre todo en el período que siguió a la 2da. Guerra Mundial con el descubrimiento de sustancias antidetonantes, que condujo a un mayor conocimiento de la forma como la naturaleza del combustible afectaba la combustión. Otro factor más reciente que ha influido en el diseño de los motores de combustión interna alternativos es la disminución de las emisiones contaminantes químicas y acústicas.

### **EL MOTOR WANKEL**

Hacia 1956 el ingeniero alemán Federico Wankel inventaba un nuevo motor de combustión interna cuyo principio no era alternativo sino rotativo. Es un motor de encendido provocado mecánicamente distinto a los anteriormente mencionados. Como se muestra en la Imagen 21, este motor consta de un cárter provisto de una cámara de forma especial dentro de la cual gira un émbolo rotativo que tiene forma de triángulo curvilíneo; el émbolo está dotado de un dentado interior que engrana con un piñón solidario al cigüeñal del motor, sobre el cual gira el émbolo excéntricamente.

La gran ventaja del motor Wankel, como se le suele llamar en memoria a su inventor, consiste en que sus piezas no suben ni bajan, sino que giran. Pesa menos, es más compacto y tiene menor número de partes móviles que el motor convencional. El eje de salida gira al triple de velocidad que el rotor triangular. El rotor mantiene sus tres vértices en continuo contacto con la superficie interior lo que hace difícil el sellado de las cámaras de combustión. Entre otras desventajas se encuentran las elevadas fugas y las grandes pérdidas por transferencia de calor. En la Imagen 22 se aprecia el funcionamiento del motor Wankel. Actualmente este tipo de motores lo llevan los japoneses Mazda [25] en su serie RX [26].

A nivel experimental, esta misma casa ha sacado el Mazda Miata de hidrógeno con motor Wankel, conocido como el MX – 5.[27]

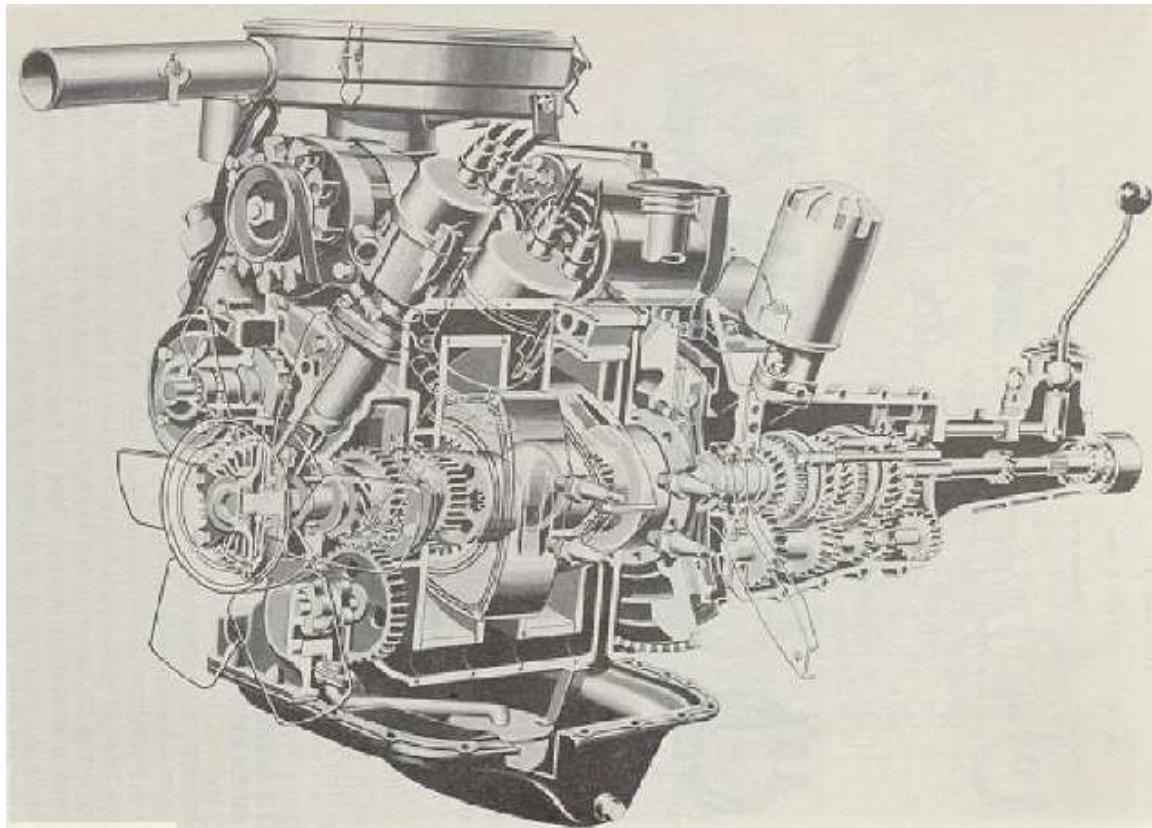


Imagen 21. Motor Wankel [Heywood, 1988]

El motor Wankel, sin duda, ha sido un gran marginado en la historia reciente de los motores. Los principales fabricantes de motores en el mundo, han hecho grandes esfuerzos en optimizarlos motores convencionales de pistones y han dejado de lado este prometedor prototipo. Investigando más en mejorar sus desventajas, especialmente las fugas y el sellado, podría llegar a obtenerse una gran potencia específica (relación potencia / peso o potencia / volumen) propia de la concepción original del ingeniero F. Wankel.

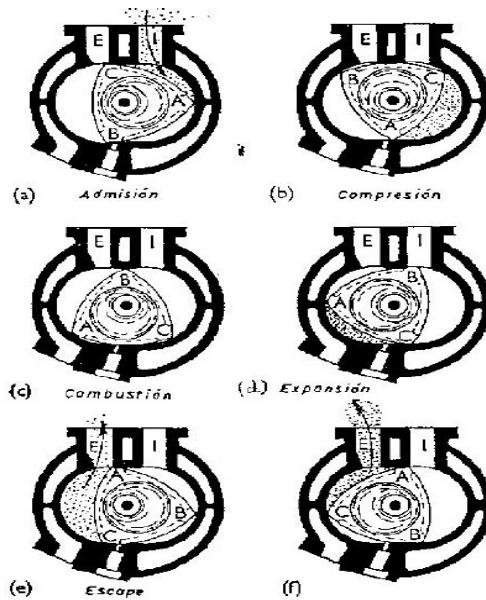


Imagen 22. Principio de funcionamiento del motor Wankel [Heywood, 1988]

Recientemente se ha retomado el motor Wankel como un gran candidato para la utilización de algunos combustibles alternativos como el gas natural comprimido (GNC) [28], el gas licuado de petróleo (GLP) [29], el hidrógeno y algunos combustibles con compuestos nitrosos. La principal ventaja que ofrece este motor es que se evitan una gran cantidad de complejidades asociadas con el proceso de combustión propias de los motores convencionales.

En el caso particular del hidrógeno, éste tiene una temperatura de ignición baja lo que implica en los MCIA problemas de pre – encendido y de retro llama por el puerto de admisión. En el motor Wankel tampoco hay problemas de encendido por puntos calientes debido a que la zona de combustión está alejada del puerto de admisión.

En un artículo publicado en 1996, Salanki y Wallace, mostraron los resultados de algunos ensayos de un motor Wankel de 2,2 kW quemando hidrógeno. Aunque el objetivo de estos investigadores era emplear el motor Wankel como parte de un sistema de potencia híbrido, ha quedado de manifiesto el potencial de este motor para el uso de combustibles alternativos, sin necesidad de pasar por tecnologías tan avanzadas al día de hoy como la pila de combustible.

## **4.2- Introducción a los sistemas de aumento de rendimiento y reducción de emisiones en el MACI**

Cómo ya se expuso en los apartados introductorios del proyecto y tras el análisis de la problemática que rodea al MACI, se va a proceder a analizar con detenimiento, las distintas soluciones y sistemas que se han creado e implementado en el motor alternativo de combustión interna.

Se estudiarán las aplicaciones desarrolladas, en desarrollo o con expectativas de aplicación más notables, de modo que al final del escrito quede conciencia de la situación tecnológica en la que se encuentra el motor de combustión. Entrarán en análisis soluciones de búsqueda de aumento del rendimiento (quedando implícita la reducción en el consumo) cómo de disminución de las emisiones contaminantes, todo ello desarrollado en el marco de la automoción.

El estudio se va a centrar en 6 bloques principales; se buscará en primer lugar conocer técnicas desarrolladas para optimizar el proceso de la inyección, todo ello pasando por un análisis de este, tanto en motores gasolina como Diesel.

Por otro lado será objeto de análisis el accionamiento flexible de válvulas mediante la puesta en conocimiento de las distintas alternativas desarrolladas en torno al tema, con el objetivo principal de adaptar la alzada de estas a las condiciones de funcionamiento del motor, tratando de optimizar el uso del combustible al máximo. Posteriormente entraremos a exponer los sistemas de admisión variable, para continuar con el análisis del funcionamiento y de los componentes que forman parte de un proyecto en desarrollo cómo es el sistema de compresión variable (VCR).

Se estudiarán las emisiones en los motores de combustión, que sentarán las bases para la implementación de los distintos sistemas y soluciones de post-tratamiento creados para minimizarlas e incluso eliminarlas.

Será también objetivo del proyecto conocer las distintas técnicas de sobrealimentación, pasando por el turbocompresor, las dobles etapas de compresión, los compresores de geometría variable y los compresores volumétricos.

En los últimos apartados del proyecto se hablará de los biocombustibles, de su viabilidad, de las medidas desarrolladas para su potenciación y del marco regulatorio tanto a nivel Europeo como nacional.

## **4.2.1 Optimización del sistema de inyección**

### **4.2.1.1. - La inyección**

Los sistemas de inyección de combustible se pueden clasificar atendiendo a diversos criterios, el más importante de los cuáles, es considerar que se inyecte o no el combustible en el cilindro (inyección directa o indirecta). Dentro de la inyección indirecta caben otros criterios como el número de inyectores (monopunto o multipunto), el control sobre la cantidad de combustible (por caudal o por tiempo de inyección), el tipo de variables operativas del motor medidas para calcular la cantidad de combustible (caudal de aire o presión en el colector), o si el accionamiento de los inyectores es simultáneo o no.

El proceso de inyección es preciso y tedioso, y no es el estudio exhaustivo de la teoría de la inyección lo que en este proyecto se busca, sino un análisis genérico de este proceso, que permita exponer y desarrollar los sistemas creados para perfeccionarlo.

Es destacable tener en cuenta que desde que el uso del carburador y el complejo proceso de dosado y regulación de la mezcla en MEP dejó paso a los sistemas de inyección actuales, las diferencias en este campo, entre los motores de gasolina y motores Diesel han disminuido notablemente.

Tanto en gasolina como en Diesel, existen la inyección directa e indirecta. En Diesel lo más usado es el sistema Common-Rail y el inyector bomba, ambos sistemas de inyección directa, ya que como se comentará más adelante, la indirecta en Diesel está en desuso. La inyección directa en motores Diésel, guarda algunas diferencias notables con respecto a la inyección directa en gasolina, por ejemplo, la presión de inyección en gasolina es mucho más baja, el combustible, obviamente es distinto, adquiriendo en el caso de la gasolina mayores volatilidades que el gasóleo y por último la combustión se inicia con una chispa en el caso de los MEP.

### **4.2.1.1.1 La inyección en motores de gasolina**

#### **4.2.1.1.1 El sistema de inyección directa**

Con respecto a la inyección en motores de gasolina, los fabricantes cada vez más, se están inclinando por sistemas de inyección directa. Pero ha sido a través del desarrollo del control electrónico de motores cuando ha tenido su máximo desarrollo, y es que, mediante el uso del carburador, y su regulación mecánica de la mezcla, y el posterior uso de la inyección indirecta, las necesidades estaban cubiertas. Actualmente, la exigencia de mejores rendimientos y menores emisiones han llevado a la inyección directa a generalizar su uso.

Por poner un ejemplo, el fabricante Bosch [28] lleva tiempo aplicando sus sistemas de inyección a los motores de inyección directa. Hace más de 60 años en los motores de aviación y también en el Mercedes 300 SL [29] del año 1954, con las puertas abatibles en forma de alas de mariposa. Este sistema de inyección funcionaba igual que el utilizado por los motores Diesel, es decir, estaba dotado de una bomba de inyección en línea que tiene tantos elementos de bombeo como cilindros tiene el motor y accionados por un árbol de levas sincronizado con el cigüeñal. La presión de inyección con la que trabajaba este sistema es de 15 a 20 kp/cm<sup>2</sup>, la cual si la comparamos frente a un Diesel (150 a 400) es muy baja, lo que hacía que la precisión del equipo de bombeo no fuera muy elevada. Pero tenía el enorme inconveniente de la lubricación, ya que la gasolina no es lubricante, e implicaba la necesidad de lubricar la bomba lo que encarecía su fabricación. También los inyectores debían lubricarse, lo cual lo complicaba en extremo. Los inyectores que estaban en contacto con las altas presiones y la temperatura que se alcanzaba en la cámara de combustión del motor hacían que se deterioraran rápidamente y requirieran un gran mantenimiento por ello esta inyección directa solo se usaba en vehículos muy exclusivos o deportivos.

Por las razones expuestas anteriormente Bosch apartó el desarrollo de esta tecnología, hasta que la utilización masiva de la electrónica hizo más fácil desarrollar un sistema lo suficientemente fiable y a un precio ajustado.

La marca Mitsubishi [30] fue la primera en construir motores de inyección directa de gasolina. En este motor la gasolina es inyectada directamente en el cilindro, con lo que se eliminan perdidas y se mejora el rendimiento. La cantidad exacta de gasolina se introduce con una temporización muy precisa, consiguiendo una combustión completa. Las innovaciones tecnológicas que presentan estos motores son:

- Colectores de admisión verticales.
- Pistones con una forma especial (deflector).
- Bomba de combustible de alta presión.
- Inyectores de alta presión.

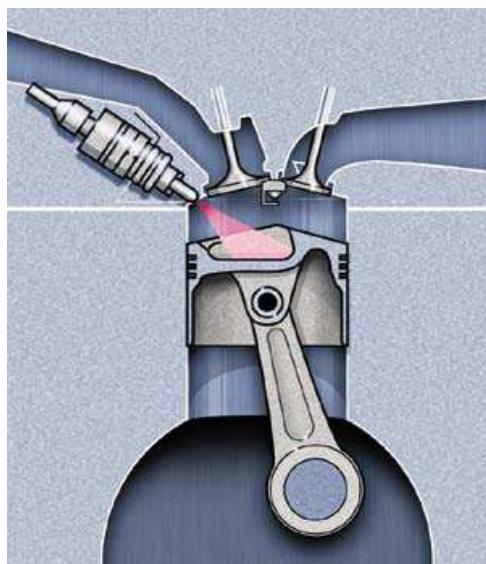


Imagen 23. Inyección directa

Si comparamos el sistema de inyección en los colectores (inyección indirecta también llamados MPI) con la inyección directa de gasolina, entendemos porqué esta ultima es superior a la primera. Los inyectores de un motor de gasolina (MPI) suelen estar ubicados en el colector de admisión, lo que explica la denominación de estos sistemas. El combustible es inyectado por delante de una válvula cerrada o bien encima de la válvula abierta y es mezclado de forma casi completa con el aire de admisión en cada una de las toberas del colector de admisión. Pero esta mezcla de aire y neblina de combustible inyectado no permite su perfecta explosión en el cilindro si no está preparada conforme a una exacta relación estequiométrica comprendida en unos límites muy específicos (1/14,7). En el caso de los motores dotados de un catalizador de tres vías es válida la ideal ecuación de lambda igual a uno.

Esta precisa relación de aire/combustible tiene que ser ajustada durante cada uno de los ciclos del motor cuando la inyección tiene lugar en el colector de admisión. El problema de estos sistemas de inyección (indirecta) viene dado principalmente a cargas parciales del motor cuando el conductor solicite una potencia no muy elevada, por ejemplo, (acelerador a medio pisar). Los efectos se podrían comparar con una vela encendida dentro de un envase que se va tapando poco a poco por su apertura superior: la llama de la vela va desapareciendo conforme empeoran las condiciones de combustión. Esta especie de estrangulación supone un desfavorable comportamiento de consumo de un motor de ciclo Otto en los momentos de carga parcial.

Es aquí donde se declaran las grandes virtudes de la inyección directa de gasolina. Los inyectores de este sistema no están ubicados en las toberas de admisión, sino que están incorporados de forma estratégica con un determinado desplazamiento lateral por encima de las cámaras de combustión. Otra de las ventajas es que se evita la acumulación de combustible en los colectores de admisión con el paso del tiempo.

La inyección directa de la gasolina posibilita una definición exacta de los intervalos de alimentación del carburante en cada ciclo de trabajo de los pistones así como un preciso control del tiempo que se necesita para preparar la mezcla de aire y combustible. En unas condiciones de carga parcial del motor, el combustible es inyectado muy cerca de la bujía y con una determinada turbulencia cilíndrica (efecto swirl) al final de la fase de compresión mientras el pistón se está desplazando hacia su punto muerto superior. Esta concentrada carga de mezcla puede ser explosionada aunque el motor se encuentre en esos momentos en una fase de trabajo con un determinado exceso de aire (1/12.4). Su grado de efectividad termodinámica es correspondientemente más alto. Comparado con un sistema de inyección en el colector de admisión (MPI) se obtienen unas importantes ventajas de consumo de combustible merced a la eliminación de la citada estrangulación.

### **El colector de admisión vertical**

Con este tipo de colector se consigue crear un flujo de aire en la admisión del tipo giratorio en sentido de las agujas del reloj, con el que se consigue un mayor rendimiento. La ventaja de este sistema de flujo giratorio respecto al turbulentó utilizado en la manera clásica (inyección indirecta), es que en este ultimo tiende a concentrarse el combustible en la periferia del cilindro y por tanto alejado de la bujía, en cambio el giratorio permite concentrarlo en el lugar que mas interesa para una mejor combustión, alrededor de la bujía.

El hecho de que se realice siguiendo el sentido horario obedece a la necesidad de evitar que por medio de la inyección directa de gasolina choque con la bujía, ya que esto crea una acumulación de hollín que provoca falsas explosiones. Si el flujo girara hacia la izquierda no daría el tiempo suficiente para conseguir que el chorro de gasolina inyectado directamente se vaporizase.

El ángulo relativamente grande del inyector ayuda a asegurar que también tendrá tiempo suficiente para que el chorro pulverizado se combustible se vaporice, incluso cuando se inyecta durante la carrera de compresión. El deflector del pistón ayuda a concentrar la mezcla de aire/gasolina rica alrededor de la bujía.

Esta mezcla estratificada de forma ideal, rica alrededor de la bujía, pobre en la periferia, permite que el motor funcione suavemente en el modo de combustión ultra-pobre, con la asombrosa relación de aire 40/1(en el caso GDI de Mitsubishi), con lo cual se consigue una importante economía de combustible.

Los motores de inyección directa gasolina funcionan con dos tipos de mezcla según sea la carga del motor: mezcla estratificada, mezcla homogénea y una transición que comentaremos entre los dos tipos principales, la mezcla homogénea-pobre.

#### **Mezcla estratificada:**

El motor es alimentado con una mezcla poco enriquecida cuando el vehículo se desplaza en unas condiciones de carga parcial (pedal del acelerador a medio pisar). Para poder conseguir una mezcla pobre para alimentar el motor, éste debe ser alimentado de forma estratificada.

La mezcla de aire y combustible se concentra en torno a la bujía ubicada en una estratégica posición central en las cámaras de combustión, en cuyas zonas periféricas se acumula prácticamente sólo una capa de aire. Con esta medida se consigue la eliminación de la mencionada estrangulación para proporcionar un importante ahorro de combustible. La positiva característica de economía de consumo es también una consecuencia de la disminuida dispersión de calor. El aire concentrado de la manera comentada en la periferia del espacio de combustión mientras se produce la explosión de la mezcla en la zona central de la cámara proporciona una especie de aislamiento térmico. Con esta estratificación específica de la carga, el valor Lambda en el área de combustión oscila entre 1,5 y 3. De este modo, la inyección directa de gasolina alcanza en el campo de carga parcial el mayor ahorro de combustible frente a las inyecciones convencionales, en marcha de ralentí incluso un 40%.

Durante la fase de admisión, el volumen de aire procedente de los colectores de admisión verticales recorre la superficie curvada del pistón y refluye hacia arriba creando un potente flujo giratorio en el sentido de las agujas del reloj.

El control del flujo es posible gracias a sensores de flujo de aire, que controlan la contrapresión baja, y a dos selenoides de la válvula by-pass que permiten que grandes cantidades de aire lleguen al cilindro con suavidad, lo que es importantísimo cuando se trata de funcionar con relaciones de aire/combustible extremadamente pobres de hasta 40/1.

En la carrera de compresión del pistón la forma giratoria se descompone en pequeños y numerosos torbellinos. A continuación, en la última fase de la carrera de compresión, el inyector de turbulencia de alta presión pulveriza el combustible siguiendo una espiral muy cerrada. Este movimiento de turbulencia junto con la elevada densidad del aire comprimido y los pequeños torbellinos, mantienen compacto el chorro pulverizado de combustible. El combustible se concentra alrededor de la bujía. La estratificación es muy buena: la mezcla aire/combustible es rica en el centro y pobre en la periferia.

Finalmente salta la chispa en la bujía y el potente producto de la combustión es controlado por la cavidad esférica del pistón que se va extendiendo mediante una reacción en cadena. El resultado de todo este proceso es una mejora del 20% en el ahorro de combustible.

### **Mezcla homogénea**

El control inteligente de la inyección permite disponer asimismo de una mezcla homogénea en los regímenes más elevados (cuando se exige potencia al motor). La inyección es adaptada de forma automática y el combustible no es inyectado en las fases de compresión sino en las de admisión. Unas determinadas leyes de la termodinámica imponen, no obstante, un aumento del llenado de los cilindros y una disminución de la temperatura de compresión en estas condiciones. Estos ajustes tienen unos efectos secundarios también muy positivos que se manifiestan en forma de unos elevados valores de potencia y par motor. Con una relación de compresión alta por encima de 11 (11,5:1) ofrece un valor significativamente más alto que un motor dotado de un sistema de inyección MPI (indirecta).

Con mezcla homogénea el combustible se inyecta durante la carrera de admisión para crear un efecto de refrigeración, el inyector de alta presión cambia la forma de funcionar en este modo para alimentar el combustible mediante un chorro largo en forma de cono, con objeto de conseguir una dispersión en el cilindro.

El efecto de refrigeración evita las detonaciones o combustión espontánea en el cilindro que pueden producirse cuando el motor tiene una relación de compresión alta y con un elevado calentamiento.

### **Mezcla homogénea-pobre**

El motor trabaja en el modo homogéneo-pobre durante la transición entre el modo estratificado y el homogéneo.

La mezcla pobre se encuentra distribuida de un modo homogéneo en la cámara de combustión. La relación de aire y combustible es de lambda 1,55, aproximadamente.

### **Ventajas**

- Desestrangulación en los modos operativos con mezcla "estratificada". En estos modos operativos se trabaja con un valor lambda comprendido entre 1,55 y 3. Esto permite abrir más la mariposa y aspirar más aire, por que tiene que superar una menor resistencia que provocaba la valvula de mariposa al estar medio cerrada.
- En el modo estratificado el motor trabaja con un valor lambda desde 1,6 hasta 3, consiguiendo una reducción de consumo de combustible considerable.
- Menores pérdidas de calor cedido a las paredes de los cilindros. Esto es debido a que en el modo de mezcla estratificada la combustión únicamente tiene lugar en la zona próxima de la bujía, esto provoca menores pérdidas de calor cedido a la pared del cilindro, con lo cual aumenta el rendimiento térmico del motor.
- Debido al movimiento intenso de la mezcla en el modo homogéneo, el motor posee una alta compatibilidad con la recirculación de gases de escape, equivalente hasta un 25%. Para aspirar la misma cantidad de aire fresco que cuando trabaja con bajos índices de recirculación de gases se procede a abrir la mariposa de gases un tanto más.

- De esa forma se aspira el aire superando una baja resistencia y disminuyen las pérdidas debidas a efectos de estrangulamiento.
- Con la inyección directa del combustible en el cilindro se extrae calor del aire de admisión, produciéndose un efecto de refrigeración de éste. La tendencia al picado se reduce, lo que permite aumentar a su vez la compresión. Una mayor relación de compresión conduce a una presión final superior en la fase de compresión, con lo cual también aumenta el rendimiento térmico del motor.
- Es posible reducir el régimen de ralentí, y se facilita el arranque en frío debido a que al reanudar la inyección el combustible no se deposita en las paredes de la cámara de combustión. La mayor parte del combustible inyectado puede ser transformada de inmediato en energía utilizable. El motor funciona de un modo muy estable, incluso al trabajar con regímenes de ralentí más bajos.

### Inconvenientes

- Uno de los problemas principales que plantea la inyección directa de gasolina es el tratamiento de los gases de escape para cumplir las normativas anticontaminación. Los óxidos nítricos que se producen con motivo de la combustión en el modo "estratificado" y en el modo "homogéneo-pobre" no pueden ser transformados suficientemente en nitrógeno por medio de un catalizador convencional de tres vías. Los óxidos nítricos se acumulan internamente en ese catalizador y se transforman en nitrógeno mediante medidas específicas para ello.
- Otro inconveniente reside en los problemas que plantea el azufre en la gasolina. Debido a la similitud química que tiene con respecto a los óxidos nítricos, el azufre también se almacena en el catalizador-acumulador de NOx y ocupa los sitios destinados a los óxidos nítricos. Cuanto mayor es el contenido de azufre en el combustible, tanto más frecuentemente se tiene que regenerar el catalizador-acumulador, lo cual consume combustible adicional.

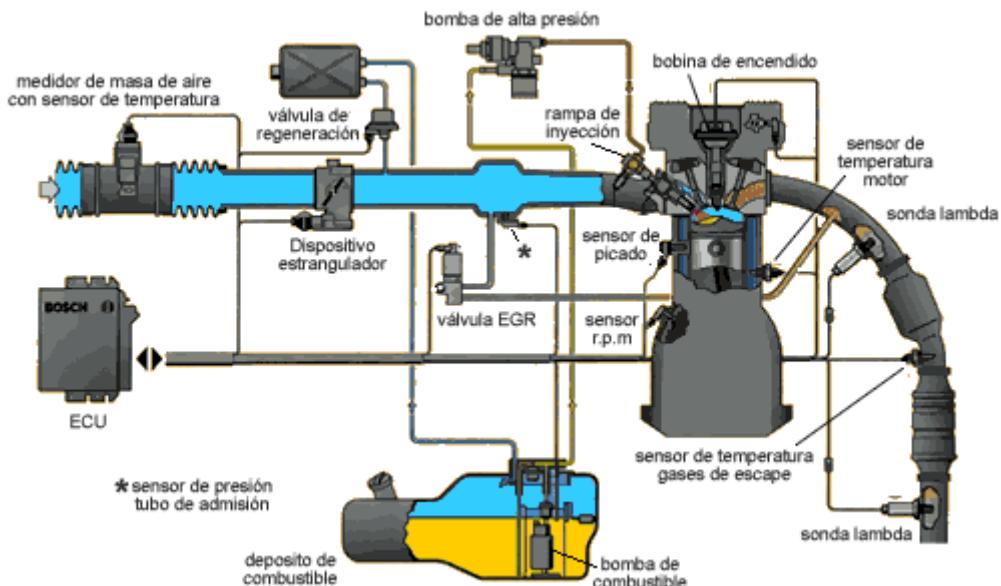


Imagen 24. Sistema de inyección directa de gasolina.

#### **4.2.1.1.1.2.- El sistema de inyección indirecta**

En el caso de la inyección indirecta, el combustible se inyecta a través de un inyector por cilindro (inyección multipunto) en las proximidades de las válvulas de admisión. Este es el tipo de inyección más utilizado en los MEP actualmente y tiene la ventaja frente a la carburación de que la superficie bañada por el combustible en el colector es pequeña, evitando problemas transitorios de aceleración y desaceleración. La calidad de la mezcla aire-combustible puede ser buena porque las velocidades del aire en las proximidades de la válvula de admisión son altas. Históricamente se empleó en algunos motores un sistema con un único inyector para todos los cilindros (inyección monopunto), en la posición que tendría el carburador convencional, aportando algunas ventajas frente a éste, pero manteniendo gran parte de los problemas transitorios debido a la superficie mojada del colector de admisión.

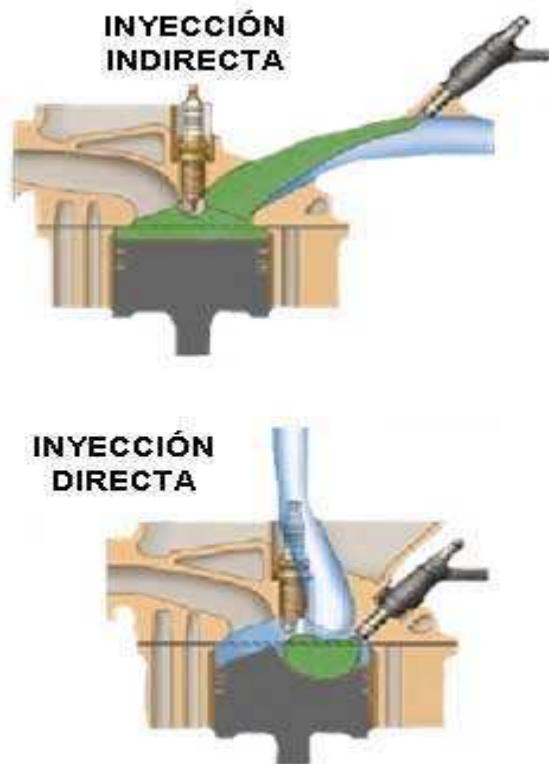


Imagen 25. Inyección indirecta y directa

Se observa en la imagen la diferencia en el diseño de la cámara de combustión y la forma del pistón en ambos casos. En el caso de la inyección directa, la colocación estratégica del inyector y la bujía y la forma de la parte superior del pistón permite que la turbulencia horizontal (tumble) que se asemejaría al movimiento helicoidal del aire (swirl) al entrar en la cámara, permita la homogeneidad de la mezcla y el direccionado hacia la bujía.

#### **4.2.1.1.2.- La inyección en motores Diesel**

Desde un punto de vista general la formación de la mezcla en un MEC está caracterizada por los siguientes condicionantes:

- La inyección debe comenzar en un punto perfectamente definido y con una ley definida de forma que el proceso de combustión se desarrolle con las mínimas emisiones contaminantes y un rendimiento elevado, acotándose los gradientes de presión debidos a dicho fenómeno.

- La cantidad de aire con la que trabaja el motor no cambia sustancialmente al regular la carga, pero sí se varía fuertemente el dosado. A este método de control se le denomina regulación cualitativa.

- El poco tiempo disponible para formar la mezcla impone limitaciones importantes al motor y exigencias al sistema de inyección. Así, el régimen de giro de los MEC está limitado entre otras razones por el tiempo necesario para la inyección, atomización, mezcla con el oxidante y combustión. En consecuencia, el sistema de inyección debe de ser capaz de conseguir unas características físicas del combustible que favorezcan el proceso de mezcla y combustión completa del mismo.

Es necesario destacar que existen al igual que en los MEP dos tipos de inyección en función del tipo de motor Diesel: la inyección directa y la indirecta.

En el caso de la indirecta, es el aire quién se encarga de generar la realización de la mezcla, mientras que en la directa es al revés.

El hecho de que los motores de inyección directa gocen de mayor rendimiento que los de indirecta, fruto de sus menores pérdidas de calor debido a la menor relación superficie/volumen, ha llevado al primero a desplazar al segundo en el mercado, estando éste último claramente en desuso.

Cómo se ha comentado al inicio los dos sistemas principales son tanto el inyector-bomba como el Common-Rail.

#### **4.2.1.1.2.1.- El inyector-bomba**

El inyector bomba es un sistema en el que el inyector, la bomba y la válvula electromagnética constituyen una unidad compacta, ubicada en la culata del motor, que es accionada mecánicamente con una leva y electrónicamente, como en el Common-Rail, con la ECU.

Este es otro de los sistemas con los que algunos fabricantes están solventando el problema de la baja emisión de gases contaminantes con un consumo controlado. La función mecánica básica del inyector bomba parte de la succión directa del combustible hacia el inyector con la actuación de un balancín flotante accionado por una serie de levas suplementarias.

Con este método también se realiza la inyección en dos fases, aunque no tiene una fácil solución técnica y tiene muy limita la posibilidad de conseguir un número mayor de inyecciones previas. Al realizar la inyección principal, a plena carga de revoluciones, se pueden pasar de los 2.000 bar de presión.

Como contrapartida no se logra una presión constante en toda la gama de revoluciones y al no poder realizar un número mayor de pequeñas inyecciones controladas previas se penaliza algo en sonoridad y vibraciones.

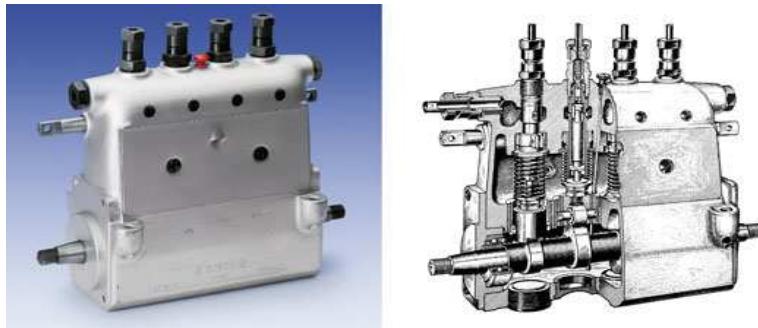


Imagen 26. Inyector-bomba

Otra diferencia entre estos dos sistemas es que, aunque ambos regulan el avance de los inyectores individualmente para cada cilindro, el que nos ofrece más presión utiliza un caudal de combustible separado para regular el inyector.

Así, cada cilindro es accionado de forma similar a como lo hacen las válvulas de combustión o escape, es decir, el árbol de levas desplaza un impulsor de rodillo que a su vez, mediante una varilla impulsora, acciona un balancín que es el encargado de situar los pistones en las posiciones correspondientes.

La cantidad de combustible que debe entrar en el inyector está dirigida por válvulas solenoides que permanecerán más o menos tiempo abiertas, dependiendo de las circunstancias de la conducción. Esto depende del gestor electrónico. Para su correcta actuación, le llegan datos recogidos en los diferentes sensores que están distribuidos por todo el vehículo, así como los datos de conducción y de condiciones ambientales.

Toda esta información es interpretada por el sistema y sobre la base de ella manda las órdenes oportunas a cada inyector bomba para que la combustión se realice de forma ajustada a cada etapa de la conducción. El sistema está preparado para mandar señales a cada cilindro de forma individualizada y ajustar el combustible a las necesidades de prácticamente cada segundo. Los principales componentes del sistema están situados en la parte fría del motor y protegidos con una robusta estructura de la suciedad, humedad y vibraciones.

Para resumir los tipos de inyectores-bomba existentes, se ha recurrido a uno de los mayores fabricantes de sistemas de inyección en la actualidad, la empresa Bosch.



Imagen 27. Evolución histórica de los inyectores bomba Bosch

El uso de la bomba inyectora en línea está muy extendido, pero el hecho del aumento de las exigencias en los motores, cómo es el aumento del rendimiento, la potencia y la reducción en el consumo, ha llevado a crear bombas inyectoras, que pulverizan el combustible con valores de presión muy elevados, básicamente el funcionamiento es el mismo, pero se han reforzado tanto la carcasa como los componentes internos, generando bombas que como regla general pueden llegar a presiones de 1300 bares, en comparación con los, aproximadamente 750 que permitían las clásicas.

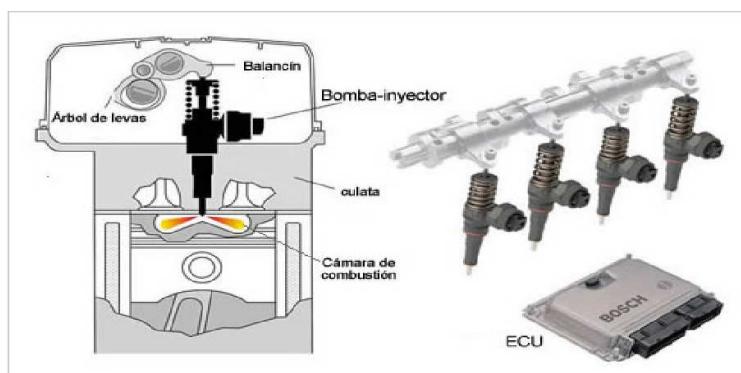


Imagen 28. Sistema inyección

### **Parte de alta presión:**

La parte de alta presión lo forma la unidad bomba-inyector, que es quién tiene la misión de inyectar el combustible, en el interior del cilindro del motor en el momento determinado por la unidad de control en una cantidad exacta y a la presión necesaria.

Hay una unidad bomba-inyector (7) por cada cilindro del motor, montada sobre la culata como hemos comentado antes. El inyector (4) de la unidad bomba-inyector penetra directamente en la cámara de combustión (8). El árbol de levas (2) del motor tiene para cada unidad de bomba inyector una leva de accionamiento. La carrera de leva es transmitida por un balancín (1) al émbolo de la bomba (6) para que este suba y baje y con ello bombee combustible y lo aspire de la alimentación.

El comienzo de la inyección y el caudal de inyección dependen de la activación eléctrica (5) de la electroválvula (3) y de la velocidad actual del émbolo de la bomba, la cuál es determinada por la forma de la leva.

Por ello el árbol de levas debe estar fabricado con precisión. Las fuerzas que actúan durante el servicio generan esfuerzos oscilantes, que hay que tener en cuenta en las tolerancias de caudal y presión.

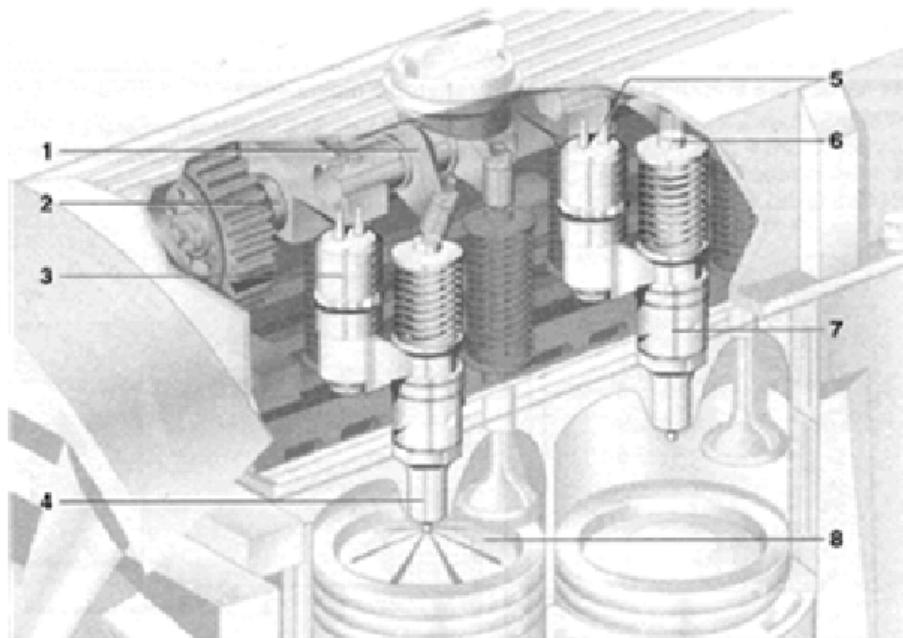


Imagen 29. Sistema de inyección 2

### La generación de alta presión:

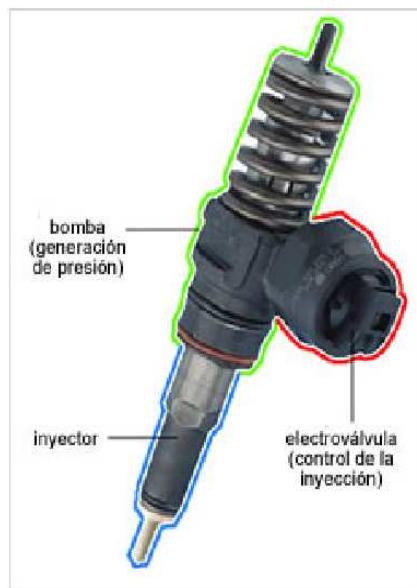
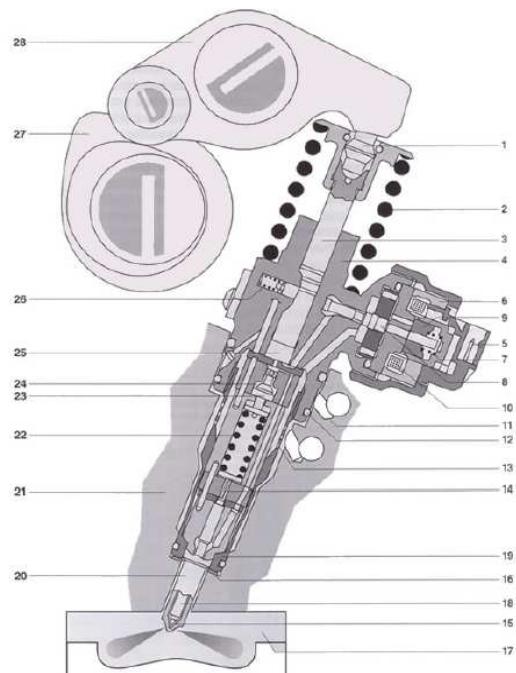


Imagen 30. Sistema de generación de alta presión de inyección

Los componentes principales a la generación de alta presión son el cuerpo de la bomba con el émbolo y el muelle de reposición.

La electroválvula de alta presión tiene la misión de determinar el momento de inyección y la duración de la inyección. Consta de los componentes principales, bobina, aguja de electroválvula, inducido, núcleo magnético y muelle de electroválvula.

El inyector pulveriza y distribuye el combustible exactamente dosificado en la cámara de combustión, el inyector está adosado al cuerpo de la unidad bomba-inyector mediante la tuerca de fijación.



1.- Perno esférico 2.- Muelle de reposición 3.- Embolo de bomba 4.- Cuerpo de bomba 5.- Conector 6.- Núcleo magnético 7.- Muelle de compensación 8.- Aguja de electroválvula 9.- Inductor 10.- Bobina de electrolíman 11.- Retorno de combustible (parte de baja presión) 12.- Junta 13.- Taladros de entrada (aprox. 350 agujeros taladrados con láser como filtro) 14.- Tope hidráulico (unidad de amortiguación) 15.- Asiento de aguja 16.- Arandela estanqueizada 17.- Cámara de combustión del motor 18.- Agua del inyector 19.- Tuerca de fijación 20.- Inyector Integrado 21.- Culata del motor 22.- Muelle de compresión (muelle de inyector) 23.- Embolo acumulador (embolo alternativo) 24.- Cámara acumuladora 25.- Cámara de alta presión (recinto del elemento) 26.- Muelle de electroválvula 27.- Arbol de levas de accionamiento 28.- Balancín de rodillo

Imagen 31. Inyector

### Funcionamiento:

Se procede a explicar el funcionamiento de sistema inyector de alta presión.

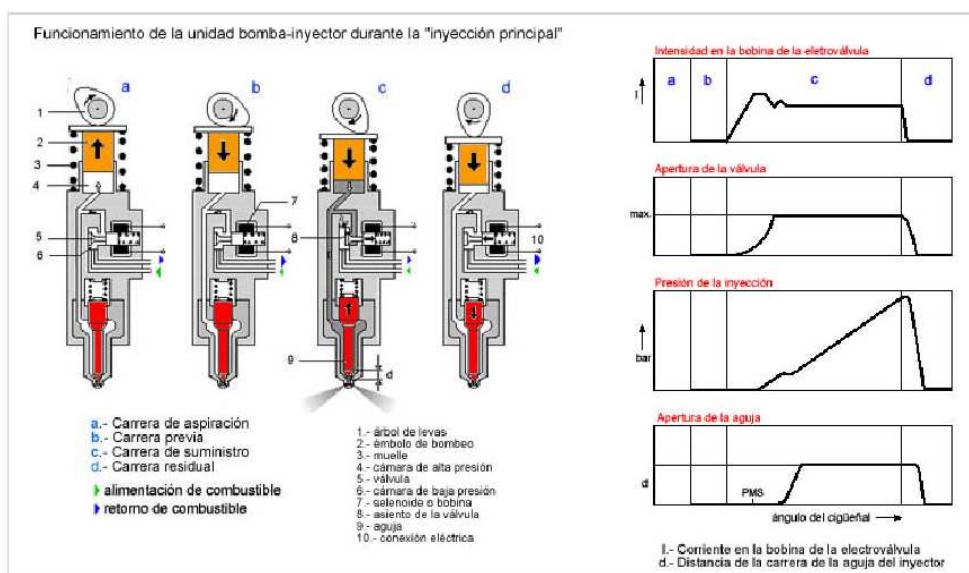


Imagen 32. Funcionamiento de sistema inyector de alta presión

**-Carrera de aspiración (a)**

El émbolo de la bomba (2) se mueve hacia arriba mediante el muelle de reposición (3). El combustible, que se encuentra permanente bajo sobrepresión, fluye desde la parte de baja presión de la alimentación de combustible, a través de los taladros de entrada integrados en el bloque del motor y el canal de entrada de combustible, a la cámara de baja presión (6) también llamada cámara de electroválvula. La electroválvula está abierta. El combustible llega a través de un taladro de comunicación a la cámara de alta presión (4).

**-Carrera previa (b)**

El émbolo de bomba baja debido al giro de la leva de accionamiento (1). La electroválvula está abierta y el combustible es presionado por el émbolo de bomba, a través del canal de retorno de combustible, a la parte de baja presión de la alimentación de combustible.

**-Carrera de alimentación y proceso de inyección (c)**

La unidad de control suministra corriente a la bobina del electroimán (7) en un momento determinado, de modo que la aguja de la electroválvula es atraída al asiento (8), por la fuerza electromotriz, cortándose la comunicación entre la cámara de alta presión y la parte de baja presión.

Este momento se denomina comienzo de inyección eléctrico. La presión del combustible en la cámara de alta presión aumenta debido al movimiento del émbolo de la bomba y con ello aumenta también la presión en el inyector. Al alcanzarse la presión de apertura de inyector de aprox. 300 bar se levantará la aguja del inyector (9) y el combustible se inyecta en la cámara de combustión (comienzo de inyección real) ó comienzo de alimentación.

A causa del elevado caudal de alimentación del émbolo de bomba sigue aumentando la presión durante todo el proceso de inyección.

**-Carrera residual (d)**

Si se desconecta la bobina del electroimán (7), la electroválvula se abre después de un breve tiempo de retardo y habilita nuevamente el paso a través de la comunicación entre la cámara de alta presión y la parte de baja presión. En la fase de transición entre la carrera de alimentación y la carrera residual se alcanza la presión punta. Ésta varía, según el tipo de bomba, entre 1800 y 2050 bar. Después de estar abierta la electroválvula la presión cae rápidamente. Al haberse quedado por debajo de la presión de cierre, el inyector se cerrará y finalizará el proceso de inyección.

El combustible restante, suministrado por el elemento de bomba hasta la cúspide de la leva de accionamiento, es presionado hacia la parte baja a través del canal de retorno.

Los sistemas de bomba-inyector son seguros intrínsecamente, o sea, que en caso de fallo, sumamente improbable, no se podrá producir más que una sola inyección descontrolada.

Puesto que la unidad de bomba-inyector está monatada en la culata, está expuesta a temperaturas elevadas. Para mantener en el nivel más bajo posible las temperaturas en la unidad bomba-inyector, se refrigerará mediante el combustible que retorna a la parte de baja de presión

### Válvula de alta presión

Se muestra esquemáticamente la electroválvula de alta presión.

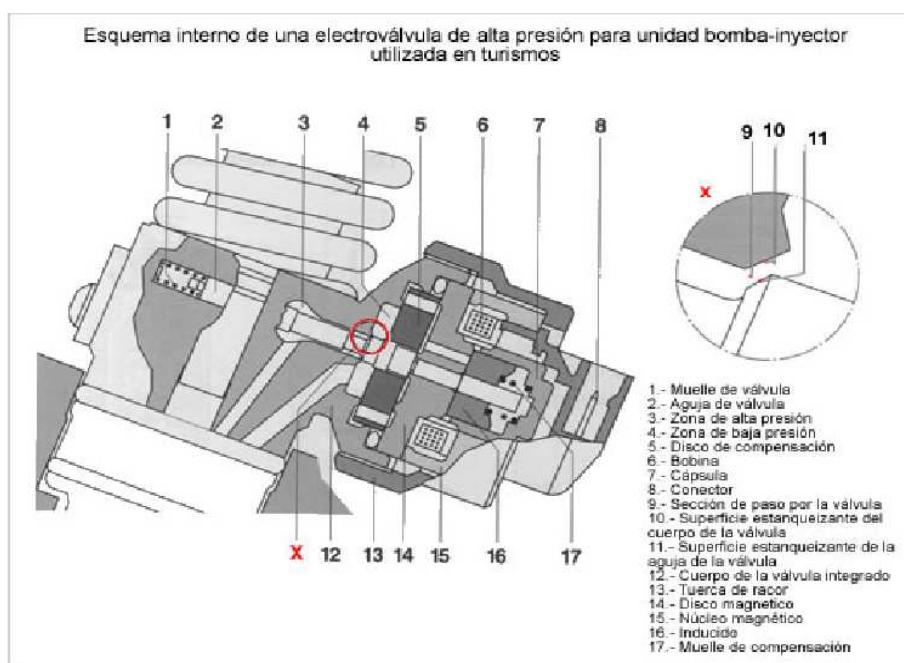


Imagen 33. Electroválvula de alta presión

El funcionamiento de la válvula de alta presión es similar al funcionamiento de cualquier electroválvula, la válvula está abierta cuando no hay corriente atravesando la bobina imán, mientras que se cierra cuando la unidad de control manda tensión al sistema.

Las bombas inyectoras de alta presión son una de las mejoras más sustanciales a nivel de aumento de la eficiencia de los motores Diesel.

Pasaremos a analizar por encima los inyectores bomba rotativos, ya que a pesar de su amplio uso en el motor Diesel, en la actualidad el uso de los inyectores-bomba de alta presión y el sistema Common- Rail, ha generado que este tipo de inyectores queden en desuso.

#### **4.2.1.1.2.2.- Bomba de inyección rotativa**

Este tipo de bombas, que tienen un único elemento que da presión al combustible mediante un distribuidor hasta todos los inyectores del motor.

El gasoil llega a la bomba de transferencia impulsado por la bomba de alimentación, y después de pasar por el filtro. Esta bomba se encarga de aumentar la presión mandando el gasoil a la válvula dosificadora. Dado que el caudal que manda es mayor que lo que puede pasar por la válvula dosificadora, el gasoil irá por otro conducto hasta la válvula reguladora de presión, la cuál es la que se encarga de mantener la presión en el circuito.

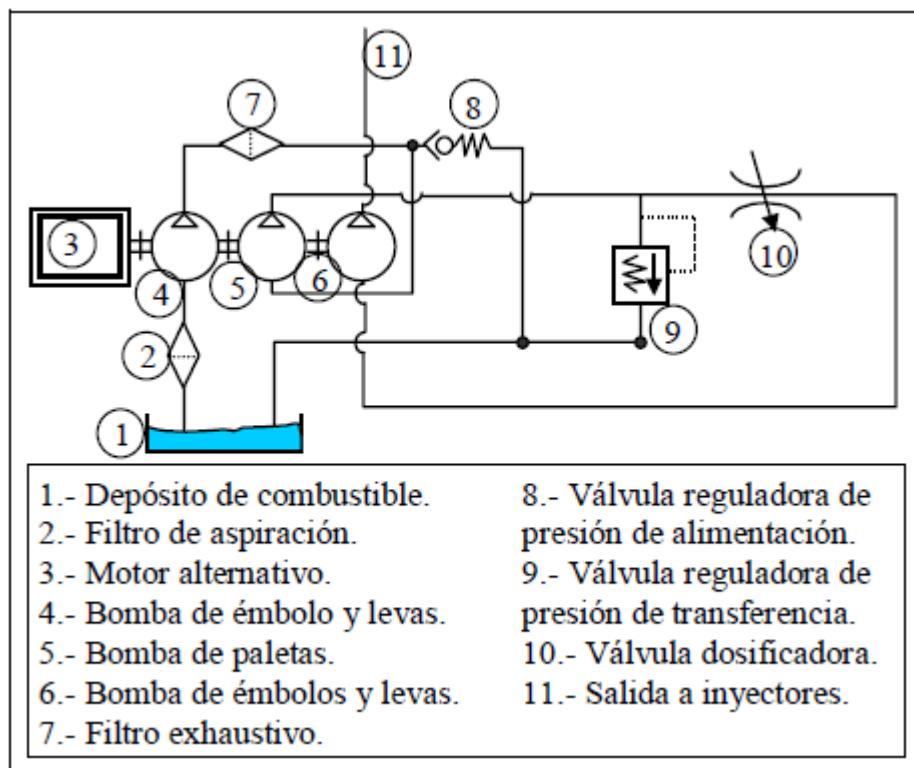


Imagen 34. Esquema de la inyección con válvula rotativa.

#### **4.4.1.1.2.3.- Sistema Common-Rail**

El “Common Rail” conocido en castellano como raíl o conducto común, es uno de los sistemas utilizados en los motores actuales para lograr alcanzar las exigentes normas de emisión de gases contaminantes. Con su eficaz funcionamiento se ha logrado un importante aumento de presión de inyección. En 1998 recibió el Premio "Paul Pietsch Preis" [30] para Bosch y Fiat [31] por el sistema Common Rail como innovación técnica para el futuro.

En general y justificado por su mayor versatilidad y flexibilidad tiene mayor nivel de aceptación que los inyectores bomba.

Es esencialmente igual a la inyección multipunto de un motor de gasolina, en la que también hay un conducto común para todos los inyectores, con la diferencia de que en los motores diésel se trabaja a una presión mucho más alta.

Con este sistema se acumula combustible a una determinada presión en el conducto común o rampa, para más adelante dosificar la cantidad necesaria a cada inyector utilizando gestores electrónicos. En la década de los 90, cuando aparecieron estos sistemas, se lograban presiones de hasta 1.400 bar.

Con esta primera generación del Common Rail se encontró un importante problema, el aumento de temperatura en los cilindros provocado por el aumento de presión. Esto no debería ser un problema de difícil solución, pero sí lo supuso el hecho de que esta circunstancia provocó el aumento de NOx, uno de los parámetros controlados por las nuevas normativas.

Los técnicos encontraron la solución en la preinyección. Realizando pequeñas inyecciones anteriores a la principal se logra crear la condición adecuada de aumento progresivo de temperatura conteniéndose, por un lado, el aumento de emisiones y, por otro, la sonoridad del motor.

Hoy por hoy se están realizando hasta tres pequeñas inyecciones antes de la principal y después una inyección posterior a esta, con lo que se han logrado aumentos de presión que rondan los 1.700 bar. Si a esto le sumamos el perfeccionamiento que están logrando los fabricantes en el diseño de los inyectores y la gestión electrónica del sistema de alimentación, alcanzamos como resultado los efectivos sistemas de inyección que se están utilizando en la actualidad y que siguen teniendo como base la tecnología del raíl común.



Imagen 35. Sistema Common Rail de Bosch

### Funcionamiento

El gasoil almacenado en el depósito de combustible a baja presión es aspirado por una bomba de transferencia accionada eléctricamente y enviado a una segunda bomba, en este caso, de alta presión que inyecta el combustible a presiones que pueden variar desde unos 300 bar hasta entre 1500 y 2000 bar al cilindro, según las condiciones de funcionamiento. Hoy en los motores diésel de Toyota [32] se inyecta el combustible con una presión de 2000 bar.

La bomba de transferencia puede ir montada en la propia bomba de alta presión, accionada por el mecanismo de distribución y sobre todo en el interior del depósito de combustible. Desde el colector común se hacen conexiones mediante tubos de acero con diámetro interior de 2 mm y diámetro exterior de 6 mm, capaces de soportar la alta presión de trabajo, hasta el electroinyector de cada cilindro.

La duración de la corriente de excitación enviada al electroinyector, la presión de trabajo y la sección de salida del combustible por la tobera son los parámetros que permiten controlar el volumen de combustible inyectado, y por tanto la energía puesta en juego. Será a través, cómo ya se ha explicado antes, de la ECU, cómo se procesará la información generada por los sensores y se conseguirá la regulación óptima.

La principal ventaja de este sistema es que nos permite controlar electrónicamente el suministro de combustible permitiéndonos así realizar hasta 5 pre-inyecciones antes de la inyección principal con lo que conseguimos preparar la mezcla para una óptima combustión. Esto genera un nivel sonoro mucho más bajo y un mejor rendimiento del motor.

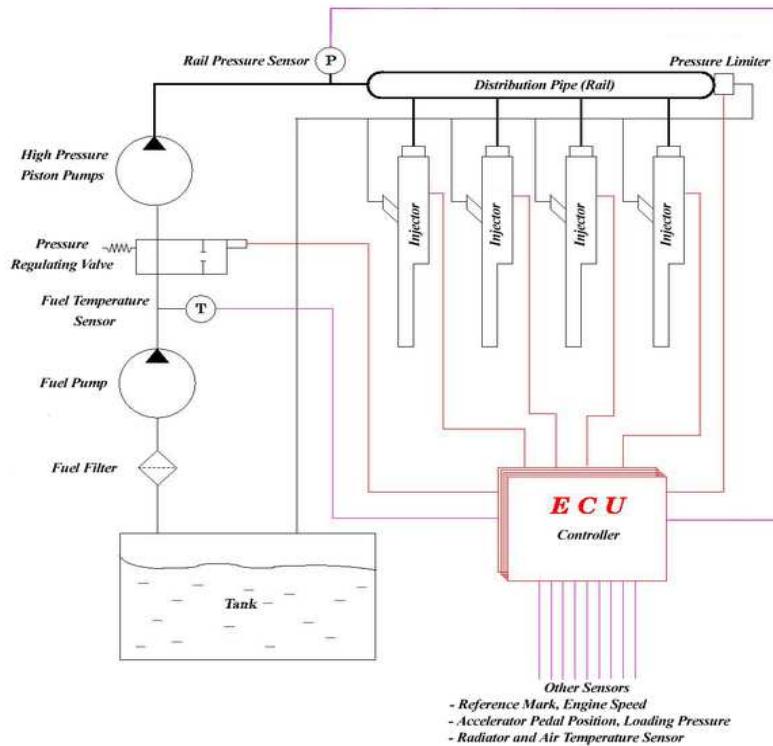


Imagen 36. Esquema de instalación del sistema Common Rail

#### Sensores principales:

- Sensor de régimen o CKP para sincronizar las inyecciones a los ciclos del motor.
- Sensor de fase o CMP para distinguir entre los cilindros gemelos (p.ej. el 2 y el 3) cuál de ellos está en fase de compresión y cuál en escape, para inyectar en el cilindro que corresponde.
- Sensor de pedal de acelerador, para detectar la carga requerida por el conductor y según la pendiente.
- Sensor de presión de Rail o RPS, para detectar la presión en cada instante.

#### Sensores secundarios.

- Sensor de temperatura del motor o ECT para compensar en el arranque en frío.
- Sensor de temperatura del gasoil para compensar con gasóleo muy caliente.

- Caudalímetro másico de aire o MAF para controlar el funcionamiento del EGR o Recirculación de gases de escape.
- Sensor de presión de admisión del colector o MAP , para detectar la sobrealimentación del Turbo.

#### Actuadores principales

- Inyectores hidráulicos de mando electromagnético, o piezoelectrónico.
- Regulador de presión del rail.
- Regulador de caudal de entrada a la bomba de alta presión.

#### Actuadores secundarios

- Electroválvula de regulación del EGR.
- Relé de control de los precalentadores.
- Mariposa de parada.

### **Inyector Common rail**

La principal ventaja de este sistema es que se puede regular la presión en los inyectores en función de la carga motor, de una manera muy precisa, con que se obtiene una regulación del caudal óptima. Por ejemplo al circular el vehículo subiendo a 2000 rpm por una ligera pendiente, la necesidad de par motor y por tanto de potencia es mayor que cuando el vehículo circula a las mismas 2000 rpm cuando baja la pendiente. En los sistemas mecánicos anteriores de inyección por bomba, la presión era prácticamente la misma y había que variar el caudal mediante variación del tiempo de inyección actuando sobre el tiempo de compresión de la bomba inyectora.

Valores típicos de presión son 250 bar a ralentí, hasta 2000 bar a plena carga (no necesariamente a revoluciones máximas).

La óptima atomización del combustible por parte de los inyectores hidráulicos de mando electrónico, controlados por una centralita de inyección electrónica, y la alta presión a la que trabaja el sistema hacen que se aumente el par y por tanto la potencia en todo el rango de revoluciones, se reduzca el consumo de combustible y se disminuya la cantidad de emisiones contaminantes, en especial los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y los hidrocarburos sin quemar.

Al no haber un mecanismo mecánico que rija cuándo se debe inyectar el combustible se puede elegir libremente cuándo inyectar, incluso realizar varias inyecciones en un mismo ciclo. Esto permite la preinyección que se produce justo antes de la principal, aumentando la presión y temperatura dentro del cilindro, lo que mejora la combustión y disminuye el ruido característico de los diésel.

### **Common-rail en la actualidad**

Actualmente, casi todos los automóviles nuevos fabricados en Europa con motor diésel incorporan common-rail identificados bajo distintas siglas según el fabricante (CRDI, CDTI, JTD, DCI, DTI, HDi ,TDCI), actualmente se empieza a incorporar en todos los TDI. Bosch, Siemens [33], Delphi [34] y Denso [35] son los fabricantes más importantes de estos sistemas. Entre sistemas mencionados existen diferencias considerables en cuanto a la regulación de la presión y el funcionamiento eléctrico de los inyectores, pero básicamente se rigen por la misma forma de trabajo mecánico.

Desde 2003, los automóviles comercializados por Fiat Group Automobiles disponen de una variante más sofisticada del sistema common-rail denominada MultiJet [36]. Esta tecnología permite un mejor control de la mezcla con hasta cinco inyecciones diferentes por ciclo, lo que conlleva mejoras en los consumos, prestaciones y menor impacto ambiental. En 2009 se comenzaron a comercializar automóviles con MultiJet II, una segunda versión de este sistema con hasta 8 inyecciones, mejorando todos los parámetros de la anterior.

Cómo se ha expuesto los sistemas de alta presión (aplicados por un lado a inyectores bomba) y por otro lado con la aplicación concreta del Common-Rail, son las tecnologías en el campo de la inyección, que mejores resultados ofrecen.

Se van a puntualizar para terminar este estudio de la optimización en la inyección, otra serie de sistemas, que paralelamente están ofreciendo resultados muy ambiciosos.

#### **4.2.1.1.2.4.- Bomba VP 44 Bosch**

El principio de funcionamiento de la VP 44 [37], una bomba rotativa de alta presión desarrollada y comercializada por la marca Bosch, es muy similar a la bomba rotativa normal, la principal diferencia está en la forma de generar la alta presión y el control electrónico.

En las bombas rotativas normales, la alta presión se genera por el movimiento axial de un sólo pistón, en este caso contamos con dos pistones colocados en sentido radial, lo que genera un mayor aumento en el rendimiento.



Imagen 37. Bomba VP 44 Bosch

#### 4.2.1.1.2.5.- Sistema de bomba unitaria

Se trata igualmente de un sistema desarrollado por Bosch, con denominación comercial UPS[38]

Consiste en una bomba unitaria de alta presión, para cada cilindro. Esta bomba es accionada por el eje de comando del motor. Por medio del control electrónico que está programado para cada condición de revolución y carga.



Imagen 38. Sistema de bomba unitaria

#### **4.2.1.1.2.6.- Sistema de unidad inyectora**

Este sistema integra la bomba de alta presión y la tobera en una sola unidad compacta para cada cilindro del motor.

El sistema UIS [39] (denominación Bosch) reemplaza el conjunto porta tobera de los sistemas convencionales, dispensando el uso de las cañerías de alta presión, lo que posibilita alcanzar elevados valores de presión.

Cada unidad inyectora está instalada en la culata del motor y realiza la inyección de combustible directamente en cada cilindro. Se controla la inyección por medio de una válvula electromagnética de accionamiento rápido, a su vez controlada por la unidad de comando electrónica, que determina el mejor momento y el volumen adecuado de combustible que va a ser inyectado para cada condición de funcionamiento del motor.



Imagen 39. Sistema de unidad inyectora

#### **4.2.1.1.2.7.- Sistema de inyector Dual**

Sistema de inyección dual fue desarrollado por Nissan Motor Co [40], diseñado para aumentar la eficiencia en motores de gasolina.

Mientras la mayoría de los sistemas de inyección utilizan un inyector por cilindro, en este caso se dobla el número de inyectores. El mayor beneficio de este sistema es el aumento de la velocidad de vaporización del combustible y la disminución del diámetro de las gotas de combustible vaporizado en un 60%, reduciendo los in quemados y las emisiones de hidrocarburos.

El sistema incorpora el valve timing control, es decir, un controlador de tiempos en las válvulas en el colector de salida, en vez de en el de entrada, como los sistemas convencionales, consiguiendo una reducción del consumo de un 4% para la misma potencia. Se podría decir que sigue siendo un sistema de inyección directa en la cámara, eso no varía, pero sí lo hacen los inyectores, que en este caso no necesitan ser de alta presión, sino tan sólo estar levemente girados uno con respecto al otro.

El sistema de Nissan es más ligero y simple porque inyecta el combustible a la presión convencional, reduciendo el coste en un 60% (por lo comentado anteriormente de la reducción del diámetro de las gotas), comparado con el sistema de inyección directa de alta presión. El sistema aparecerá a principios del año que viene, no habiendo sido confirmada la incorporación en ninguno de los modelos actuales.

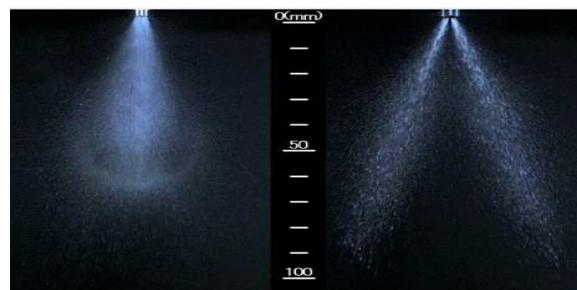


Imagen 40. Inyección Dual frente inyección estándar

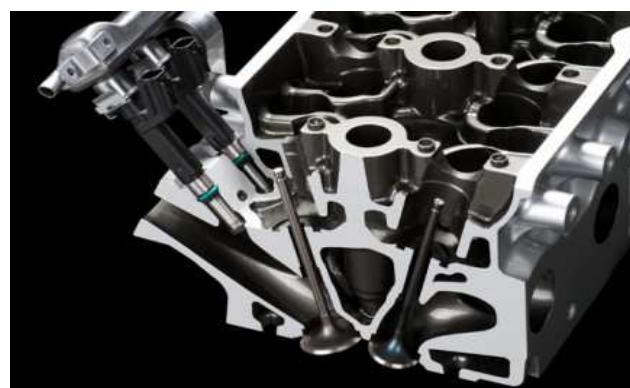


Imagen 41. Sistema de inyección Dual

## **4.2.2.- Accionamiento flexible de válvulas**

### **4.2.2.1.- Las válvulas en motores de combustión**

#### **4.2.2.1.1.- Introducción**

Previo al análisis de las mejoras surgidas sobre las válvulas de admisión y escape y el perfeccionamiento en la regulación del control de tiempos de apertura y cierre, se va a proceder , cómo en todos los apartados del proyecto, a hacer una breve explicación del funcionamiento y características básicas que hacen de esta parte del motor, por su seria implicación en el correcto funcionamiento de los ciclos de combustión y su influencia en la eficiencia y el rendimiento, un campo imprescindible de estudio.

#### **4.2.2.1.2.- Lás válvulas de asiento en motores de combustión**

Las válvulas de asiento son usadas en muchos motores de pistones para abrir y cerrar las lumbreras de admisión y de escape en la culata de cilindros. La válvula es usualmente un disco plano de metal con un largo vástago. El vástago es usado para empujar el disco de metal hacia abajo y abrir la válvula; posee un resorte que generalmente se usa para cerrar la válvula cuando no se presiona el vástago. Las válvulas desmodrómicas son cerradas por un mecanismo que actua sobre el vástago en lugar de hacerlo un resorte, y son usadas en algunos motores de autos de carreras y motos de alta velocidad, eliminando el flotado de válvulas que ocurre a altas RPM.

Para determinadas aplicaciones el vástago de la válvula y el disco son de aceros de diferentes aleaciones, o los vástagos de las válvulas son huecos y llenos de sodio para mejorar el transporte y la transferencia de calor.

El motor normalmente opera las válvulas actuando sobre los vástagos con levas y taqués. El perfil y posición de la leva determina la apertura de la válvula, cuándo y cuán rápido (o lento) se abre la válvula. Las levas son normalmente colocadas fijas en un árbol de levas el cual es engranado con el cigüeñal, girando a la mitad de la velocidad de éste, en los motores de cuatro tiempos. En los motores de altas prestaciones,el árbol de levas es móvil axialmente, las levas varían en altura, y la apertura de las válvulas también cambia, todo en relación con las RPM del motor.

A pesar de que es un mejor conductor del calor, la culata de aluminio requiere que el asiento de la válvula sea de acero, mientras que las culatas de fundición de hierro a menudo usan un asiento integral, formando parte de la culata.

Debido a que el vástago de la válvula se extiende hasta la cámara de las levas para ser lubricado, debe ser sellado para evitar que pasen los gases provenientes del cilindro. Un retén de goma evita que excesivas cantidades de aceite entren en la lumbrera de admisión, y que desde la lumbrera de escape suban los gases a la cámara del o los árboles de levas. Cuando estos retenes se gastan, es común ver humo azulado en el escape cuando presionamos el acelerador, por ejemplo al pasar los cambios.

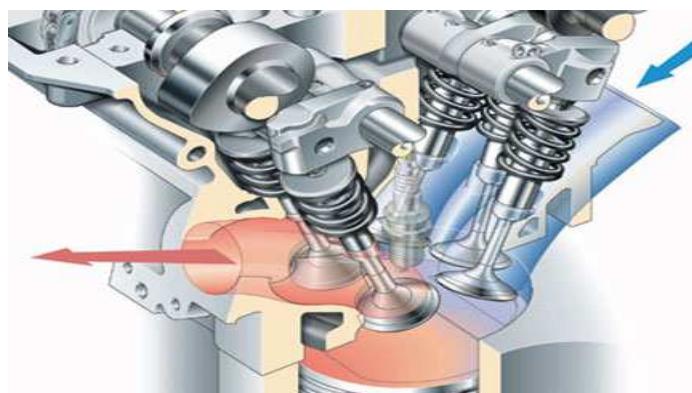


Imagen 42. Esquema entrada- salida de gases en cámara de combustión

### Posición de las válvulas

En los primeros diseños de motores las válvulas estaban al revés, en el bloque de cilindros, y paralelas a éstos, disposición que se conoce también como válvulas laterales. A pesar que este diseño es más sencillo y barato de construir, tiene dos grandes desventajas; el tortuoso camino seguido por la mezcla aire-combustible para entrar al cilindro limita el flujo de aire, e impide velocidades superiores a las 2.000-2.500 RPM, y el camino seguido por los gases de escape a través del bloque produce un sobrecalentamiento cuando el motor trabaja bajo carga en forma sostenida. Este diseño evolucionó en el IOE ("Escape Sobre Admisión", por sus siglas en inglés), donde la válvula de admisión estaba en el bloque y la de escape en la culata; más tarde ambas válvulas se colocaron en la culata, disposición que se conoce como válvulas a la cabeza.

En la mayoría de los diseños, el árbol de levas se mantuvo en el bloque de cilindros relativamente cerca del cigüeñal, y las válvulas son operadas a través de varillas y balancines.

Esto dio lugar a importantes pérdidas de energía del motor, pero era más simple, especialmente en los motores en "V" donde un solo árbol de levas puede actuar las válvulas de los dos bancos de cilindros; por esta razón, este diseño persistió más tiempo en esta configuración que en otras.

Diseños más modernos tienen el árbol de levas en la culata de cilindros, presionando directamente el vástago de la válvula (de nuevo a través de taqués); si tiene sólo un árbol de levas, es un motor SOHC ("Single OverHead Camshaft", árbol de levas simple a la cabeza). A menudo hay dos árboles de levas, uno para las válvulas de admisión y otro para las de escape, creando un DOHC ("Dual OverHead Camshaft", doble árbol de levas a la cabeza). El árbol de levas es movido por el cigüeñal, a través de engranajes, cadena o correa dentada.

### **Características constructivas de las válvulas de un motor de combustión interna**

Como consecuencia de la elevada potencia específica los órganos de la distribución están sujetos a un duro trabajo, que sólo pueden soportar si los materiales empleados para su construcción son elegidos oportunamente.

Desde el punto de vista funcional las válvulas deben resistir las elevadas y repetidas solicitudes causadas por los golpes sobre los asientos, y mantenerse sin deformaciones también bajo la acción de las altas temperaturas a las que están sometidas; la válvula de escape puede alcanzar la temperatura de 750 °C.

La válvula debe estar en condiciones de poder transmitir al aire o al agua de refrigeración el calor que recibe; la disipación del calor tiene lugar a través del contacto entre el vástago y su guía, y entre el plato y su asiento. Tiene, por tanto, gran importancia el grado de refrigeración de la guía y del asiento, así como su material. Las válvulas están tanto mejor refrigeradas cuanto menor es su diámetro (porque menor es la superficie expuesta a los gases en proporción a la superficie de contacto con el asiento) y cuanto mayor es la longitud de la guía y el diámetro del vástago (siendo mayores las superficies a través de las cuales es disipado el calor). Por ello, a los efectos de la residencia contra las solicitudes térmicas, las válvulas de escape se hacen, en general, de diámetro menor que las de aspiración y, en los cilindros de grandes dimensiones, es preferible disponer dos (o también más) en lugar de una sola de gran diámetro.

La temperatura de la válvula desciende al usar una mezcla rica y combustibles de alto calor latente de vaporización, como es por ejemplo el metanol; aumenta, por el contrario, al aumentar el número de revoluciones y a disminuir el grado de adelanto al encendido; el valor de la relación de compresión no tiene influencia directa sobre la temperatura.

## **Avances y retrasos en las válvulas**

Se denomina avances y retrasos de válvulas a los cambios en los momentos en que abren y cierran las válvulas en los motores de combustión interna de cuatro tiempos, con relación al momento teórico para hacerlo. El momento teórico para abrir y cerrar las válvulas es en el PMS y en el PMI (las válvulas de admisión abren en el PMS y cierran en el PMI, mientras que las válvulas de escape lo hacen a la inversa), pero al adelantar las aperturas y retrasar los cierres, se consigue aumentar en forma significativa el rendimiento y las prestaciones del motor, al mejorar la velocidad con la que se vacía el cilindro de los gases de la combustión, y aumentar la cantidad de mezcla aire/combustible que ingresa al cilindro.

Estos cambios son calculados por los ingenieros al diseñar el motor, y están relacionados con la posición de las levas en el árbol de levas. Para cambiar los avances y retrocesos de las válvulas, por ejemplo para aumentar la potencia en un motor destinado a competiciones, es necesario reemplazar el árbol de levas completo. Tanto el avance como el retroceso se mide en los grados que gira el cigüeñal antes o después de que el pistón alcance el PMS (punto muerto superior) o el PMI (punto muerto inferior). Los avances y retrocesos son cuatro, a saber:

### Avance de la Apertura de Admisión (AAA)

Si analizamos el funcionamiento de un motor de cuatro tiempos, vemos que el mejor momento para abrir la válvula de admisión es cuando el pistón se encuentra en el punto más alto de su recorrido (llamado punto muerto superior). Sin embargo, debido a que la mezcla aire/combustible se encuentra en movimiento, al abrir la válvula de admisión antes que el pistón llegue al PMS, permite que esta ingrese por más tiempo al cilindro, consiguiendo un mejor llenado.

### Retraso del Cierre de Admisión (RCA)

Por la misma razón, debido a la inercia que mantiene la mezcla aire/combustible, si mantenemos la válvula de admisión abierta un tiempo después que el pistón alcanzó el PMI, incluso cuando este está ya subiendo, permitimos que continúe entrando la mezcla, lo que permite un llenado aun mayor del cilindro, con el consiguiente aumento del rendimiento del motor. Otro motivo es el aumento de rendimiento o de aprovechamiento del trabajo que puede producir el motor al conseguir una carrera de expansión mas larga que la de admisión, sin embargo construir un motor que consiga esto mecánicamente requiere muchísima complejidad y además de ello las perdidas mecánicas serían incluso mayores al aprovechamiento, por no hablar de que la carrera de compresión también sería mas larga, así que no sería rentable. Al retrasar el cierre de la admisión la carrera de compresión es mas corta que la de expansión, consiguiendo este mayor aprovechamiento.

### Avance de la Apertura de Escape (AAE)

Suele ser de unos 40-45° antes del PMI, lo que permite vaciar el cilindro más rápidamente. Teóricamente, con esto se pierde potencia al estar los gases de la combustión haciendo presión sobre el pistón durante menos tiempo, pero esta pérdida es muy baja y se compensa con creces al aumentar la velocidad de vaciado del cilindro.

### Retraso del Cierre de Escape (RCE)

Al igual que en los casos anteriores, debido a la inercia que mantienen los gases de escape, éstos continúan saliendo por su válvula, incluso cuando el pistón pasó el PMS e inició la carrera descendente. La apertura de la válvula de admisión se efectúa momentos antes del cierre del escape, para optimizar, nuevamente debido a la inercia que presentan los gases frescos y quemados, el intercambio de los mismos dentro del cilindro.

### **El cruce de válvulas**

Este "solapamiento" en las aperturas de las válvulas de admisión y escape, llamado o cruce de levas o cruce de válvulas, consiste en el espacio, medido en grados sexagesimales de giro del cigüeñal, en el que la válvula de escape y la de admisión se encuentran abiertas en forma simultánea. Suele ser de unos 20° a 25° para motores normales, y en el caso de los motores de altas prestaciones, para competición, puede llegar a 35° o incluso más. Un cruce de válvulas amplio permite al motor alcanzar unas RPM más altas, pero su funcionamiento a bajas velocidades reducirá drásticamente el rendimiento del motor, entregando menos potencia y un par motor menor. Por el contrario, un cruce de levas corto, permitirá al motor obtener un buen rendimiento a regímenes bajos, pero por arriba de las 3.500/4000 RPM (dependiendo del diseño del motor) sus prestaciones decaen.

El carácter compresible de la mezcla aire-combustible, unido a los fenómenos de inercia que se producen, permiten ampliar el espacio de apertura de las válvulas, optimizando el proceso de vaciado y llenado del cilindro (lo que suele llamarse la respiración del motor), haciéndolo más eficiente. Los gases producto de la combustión han alcanzado una alta velocidad al ser barridos por el pistón en su carrera ascendente, acercándose al PMS. Los gases de escape continúan saliendo por efecto de la inercia, aun cuando el pistón ha pasado el PMS y comienza a descender. Manteniendo abierta la válvula de escape se logra vaciar completamente el cilindro de estos gases, que continúan saliendo por efecto de la inercia ya mencionada, a pesar que el pistón se encuentra descendiendo, ya en la fase de admisión.

Previo a lo expuesto anteriormente, adelantando la apertura de la admisión antes que el pistón llegue al PMS, permite que los gases de escape, que están ya saliendo a gran velocidad, arrastren tras de sí a los gases frescos, presentes en la lumbre de admisión. Así se consigue un llenado del cilindro más rápido y completo. Cuanto mayores sean los ángulos AAA y RCE mayor será el intercambio.

Por esta razón, para poder elevar las RPM del motor (al margen de otros cambios que pueden o deben hacerse en el motor), hay que acelerar el vaciado y llenado del cilindro. Esto se consigue, entre otras cosas, aumentando el cruce de válvulas. En cambio, a bajas RPM parte de los gases frescos escaparán por la válvula de escape antes que esta se cierre, con lo que la fuerza de la explosión es menor, y en consecuencia, disminuyen el par motor y la potencia.

Cómo se ha comentado, los motores de serie tienen un cruce de válvulas de 15 a 30 grados de giro del cigüeñal. En la Imagen 43 la magnitud del cruce es de 20 grados. Los árboles de levas de los vehículos de carreras tienen cruces de válvulas que van de 60 a 100 grados.



Imagen 43. Ejemplo de diagrama de distribución

Si la válvula de admisión se abre demasiado pronto, la calidad de marcha en ralentí se deteriora, mientras que el rendimiento en regímenes elevados no mejora demasiado. La velocidad máxima del pistón en el tiempo de admisión se alcanza antes de la apertura máxima de la válvula, por lo que si la válvula se abre antes, podría mejorar la respiración del motor.

El factor del cruce de válvulas que afecta al rendimiento en regímenes elevados es el cierre de la válvula de escape. De hecho, aumentar el tamaño de la válvula de escape y su orificio correspondiente no suele considerarse demasiado adecuado para la obtención de más potencia, ya que la válvula de escape limita en mayor medida el flujo procedente del cilindro a medida que se cierra.

Un cruce elevado de válvulas puede generar problemas de holguras entre la válvula y el pistón, es decir, que podrían llegar a tocarse. La elevada alzada de las válvulas no causa este problema, ya que el pistón está en una posición baja dentro del cilindro cuando la válvula se abre al máximo.

Un cruce de válvulas más reducido aumenta la presión en el cilindro a revoluciones más bajas. Los diseñadores de árboles de levas intentan minimizar el cruce de válvulas al tiempo que procuran maximizar el rendimiento en regímenes elevados.

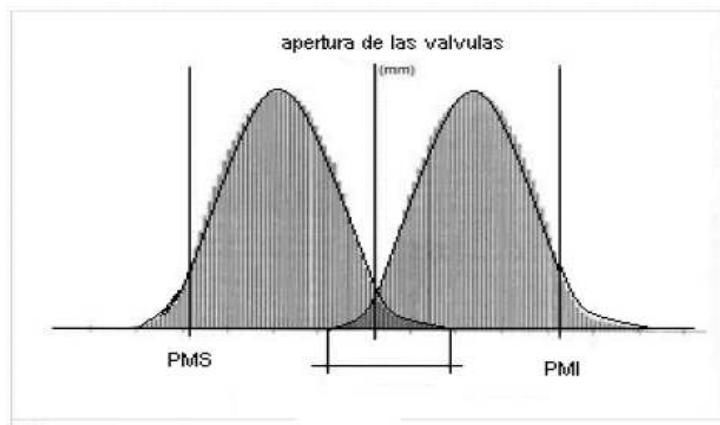


Imagen 44. Cruce de válvulas

#### **4.2.2.2.- Sistemas de Distribución Variable**

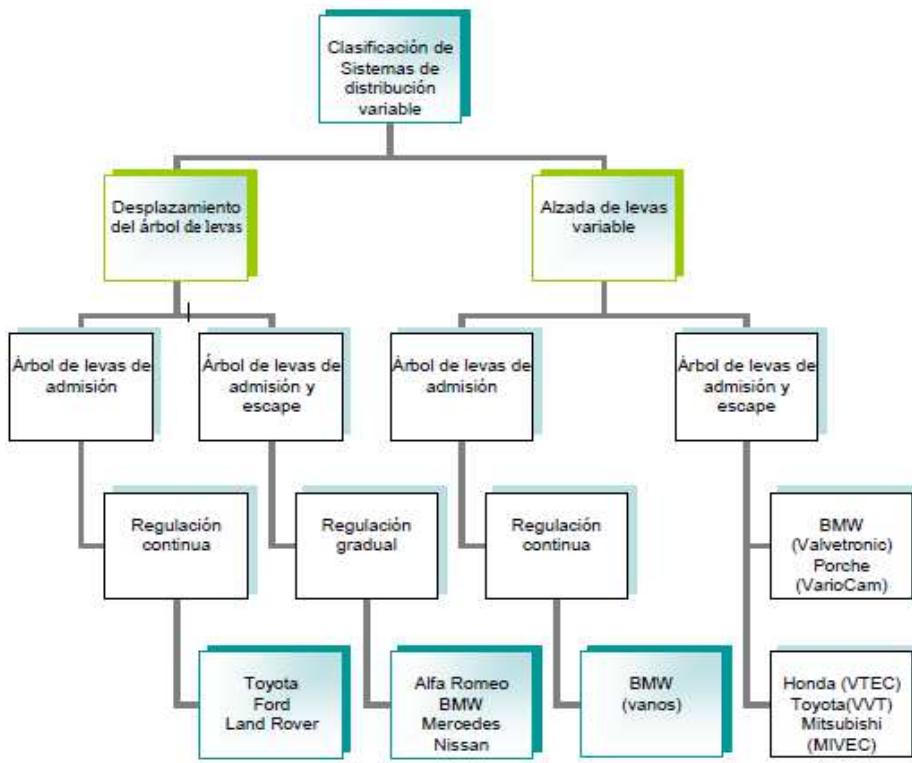
Estos sistemas permiten utilizar el tiempo óptimo de apertura y cierre de las válvulas a cualquier régimen de giro del motor. Según el fabricante del sistema se utilizan diferentes soluciones que modifican el calado de los árboles de levas, hacen actuar otra leva a altas revoluciones o modifican por medio de excéntricas la posición del árbol de levas sobre sus apoyos.

Hay dos sistemas fundamentales a la hora de variar la distribución.

1. Variación de la alzada de válvula, con ello se consigue modificar simultáneamente el avance y cierre de la válvula, además de disminuir el área de paso de los gases frescos.

2. Desplazamiento del árbol de levas con respecto al cigüeñal.

De la combinación de estos dos movimientos es posible ajustar cada uno de los ángulos de manera independiente al valor deseado.



Es importante destacar que la mayoría de estos sistemas combinan ambos métodos de regulación. Se ha considerado la clasificación cómo sigue, pero se podría haber clasificado de modo distinto.

#### **4.2.2.2.1.- Desplazamiento del árbol de levas**

##### **4.2.2.2.1.1.- Convertidores de fase**

Es posible adaptar el diagrama de distribución de un motor para conseguir un buen compromiso entre las exigencias de empuje a bajos regímenes y elevado rendimiento volumétrico (buen llenado de la cámara) a altos regímenes utilizando un variador de fase.

Los hay de varios tipos, pero el más utilizado es el que controla la admisión variando la posición angular del árbol de levas respecto al engranaje que lo arrastra. Esta variación se controla a través de un accionador electromagnético comandado por la computadora del motor, de forma que la presión del aceite en el mecanismo variador de fase permite ese desacoplamiento de unos grados en el árbol.

Los perfiles de las levas (alzada) propiamente dichos y, con ello, también la carrera de la válvula no se modifican. Para un rendimiento eficaz de este sistema basta con modificar los tiempos de distribución de las válvulas de admisión.

Los ensayos realizados han demostrado que una modificación de los tiempos de distribución de las válvulas de escape no aporta una mejora significativa.

La utilización de convertidores de fase, normalmente, solo se hace en motores con dos árboles de levas en cabeza (DOCH), tal y como los encontramos en motores multiválvulas.

Sin embargo, la primera regulación de árboles de este tipo, fabricada en serie, se introdujo en un motor de 2 válvulas por cilindro de Alfa Romeo [41] en 1987 en el modelo Twin Spark [42] de 2,0 litros, el cual también dispone de 2 árboles de levas en cabeza.

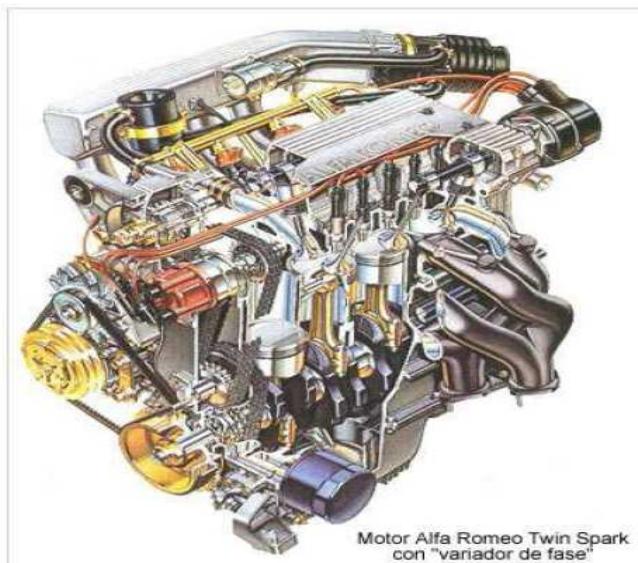


Imagen 45. Motor Alfa Romeo con variador de fase

Este motor gracias al convertidor de fase y a un doble encendido, da unos valores de rendimiento de 150 CV que, normalmente, solo los alcanzan motores multiválvulas y, por tanto, demuestra como a pesar de usar un motor de 2 válvulas se consigue unos valores de potencia elevados.

El elemento más importante del "variador de fase" es el actuador electro-hidráulico acoplado al engranaje que arrastra en rotación al árbol de levas de las válvulas de admisión.

Este actuador permite dar al mismo árbol dos posiciones angulares diversas y, por lo tanto, variar los tiempos de apertura de las válvulas de admisión.

Su regulación está dirigida por el microprocesador del sistema electrónico de gestión del motor y que en este caso es la centralita que gestiona tanto el sistema de inyección como de encendido BOSCH Motronic [43].

La lógica de actuación de la variación de fase se establece de antemano, de manera tal que el cruce de válvulas; es decir, esa fracción del ciclo de funcionamiento del motor durante la cual están abiertas de manera simultánea las válvulas de admisión y de escape se reduzca a los regímenes bajos y con poca carga, y aumente en los regímenes altos y en caso de fuerte solicitud de potencia.

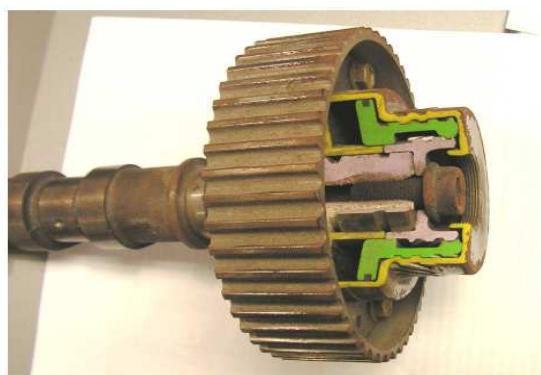


Imagen 46. Convertidor de fase

De ese modo se obtienen los siguientes resultados:

- En los regímenes altos y medio-altos y en caso de fuerte demanda de potencia (puesta en fase normal), llenado óptimo de los cilindros y, por lo tanto, máximo de la potencia y del par.
- En los regímenes bajos y medio-bajos y con reducidas cargas (puesta en fase atrasada), regularidad óptima de funcionamiento y reducción de los consumos específicos.
- En todos los regímenes, reducción al mínimo de las emisiones que contaminan.

En el convertidor de fase normalmente se regulan hacia adelante o hacia atrás los árboles de levas de admisión durante el funcionamiento alrededor de  $10^\circ$  a  $20^\circ$  con respecto al ángulo entre árboles de levas (que corresponde a  $20$  -  $40^\circ$  del ángulo de calado respecto al cigüeñal).

Para la construcción de tales mecanismos de regulación solo son adecuados aquellos mandos del árbol de levas en los que las cadenas de distribución (o correa de distribución) discurren a lo largo de los 2 árboles de levas o bien solo se accione el árbol de levas de escape.

Entre la rueda de propulsión de accionamiento del árbol de levas y el árbol de levas de admisión se instala un mecanismo electrohidráulico de torsión, que lleva a cabo la torsión relativa deseada y que es gestionada electrónicamente.

Durante la torsión del árbol de levas de admisión se modifican los siguientes parámetros del diagrama de distribución.

- El cruce de válvulas
- El inicio de la apertura de admisión.
- El fin del cierre de la válvula de admisión.

Estos parámetros tienen una influencia esencial sobre la potencia y el par motor, pero también sobre la calidad de la marcha en vacío, del comportamiento de los gases de escape y del consumo.

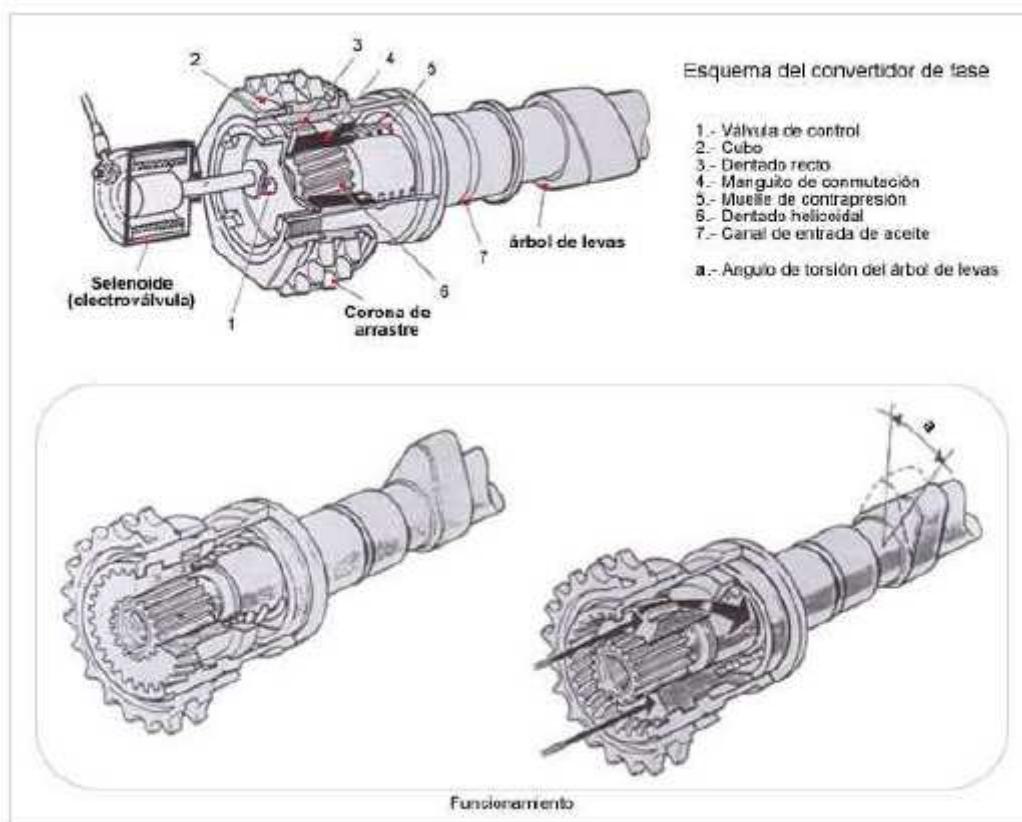


Imagen 47. Esquema de un convertidor de fase

#### **4.2.2.2.1.2 .-Sistema Vanos [44]**

El sistema Vanos es otro sistema que consigue variar el ángulo del árbol de levas este sistema no deja de ser un convertidor de fase aunque tenga una denominación distinta. VANOS son las siglas de Variable Nockenwellen Steuerung (separación variable del árbol de levas) que es un sistema de distribución variable empleado por la marca BMW. Consiste en desplazar el calado del árbol de levas utilizando la presión del aceite del sistema de engrase.

El sistema aumenta el cruce de válvulas cuando el motor gira a altas revoluciones. El adelanto o retraso del árbol de levas con respecto al cigüeñal dependerá de las condiciones de funcionamiento del motor (carga, r.p.m. y temperatura).

Por medio de una gestión electrónica del motor y también de un electroimán se conecta una válvula distribuidora 4-2 (4 vías, 2 posiciones), para lo cual un pistón hidráulico admite alternativamente presión del aceite del motor y se mantiene en sus dos posiciones iniciales posibles por medio de topes mecánicos.

En el pistón se encuentra un eje dentado montado sobre rodamientos de baja fricción, que transforma la carrera del pistón por medio de un dentado helicoidal en un giro del árbol de levas con relación a la rueda dentada accionadora. El margen de ajuste es de 25° del ángulo de calado con respecto al cigüeñal.

Gracias al sistema VANOS se ha logrado reducir el tiempo de apertura de las levas de admisión de 240° a 228°, sin reducir por eso el rendimiento máximo del motor. Esta medida tiene, ante todo una ventaja con respecto a la calidad en marcha en vacío.

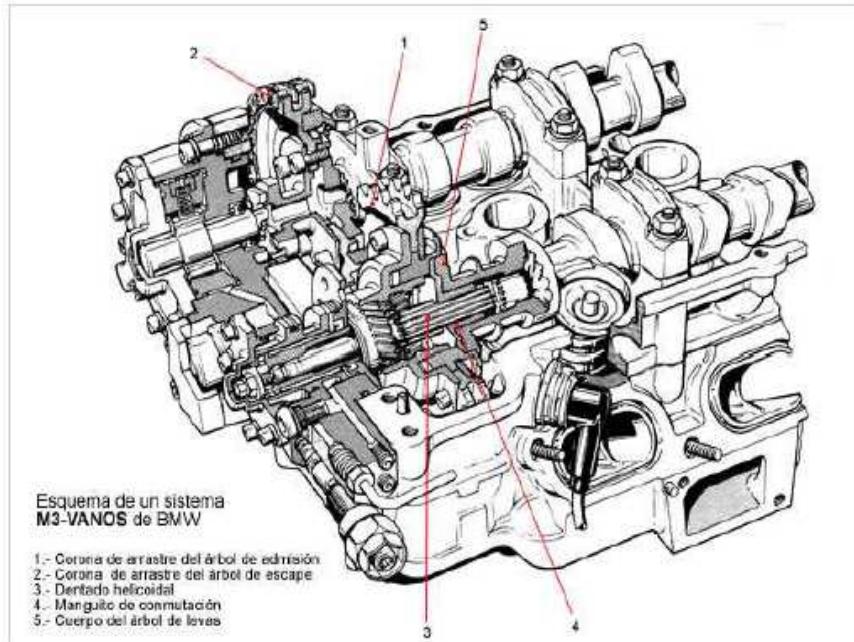


Imagen 48. Esquema de un sistema VANOS de BMW [45]

El sistema de accionamiento que utiliza el aceite a presión para su funcionamiento cuenta con un sistema propio que trabaja con una presión de 100 bar y también dispone de un depósito de aceite. La bomba de aceite de alta presión esta integrada en la unidad de regulación y se acciona por medio del árbol de levas de escape.

La presión elevada del aceite es necesaria, para mantener el pistón regulador, que realiza la torsión de la rueda dentada hacia el árbol de levas de admisión por medio de un dentado helicoidal, en cualquier posición intermedia con seguridad.

Para ello se requieren también 2 válvulas de mando electromagnéticas, así como 2 ruedas con marcas para la posición de los árboles de levas con sus correspondientes indicadores de posición. La información necesaria para la regulación procede de un mecanismo de mando propio del motor.

Con el paso del tiempo BMW incorpora la tecnología del sistema de decalador variable a los dos árboles de levas, es decir, al de admisión y también al de escape.

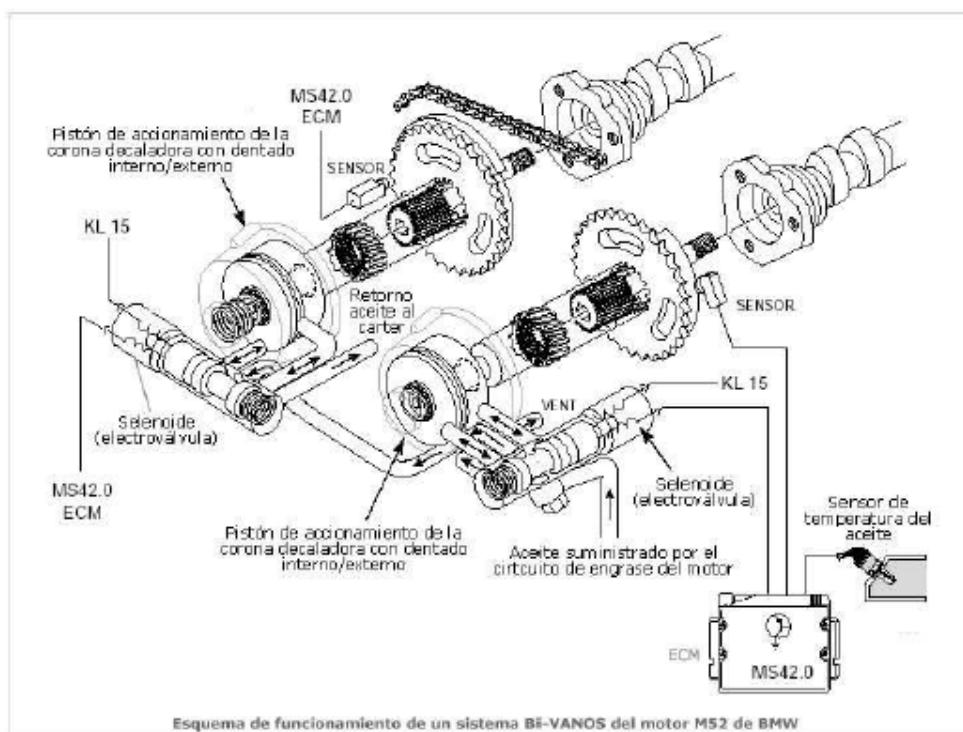


Imagen 49. Esquema de funcionamiento de un sistema BI-VANOS de BMW

Se regulan en continuo los árboles de levas de admisión y de escape dentro de un campo amplio, lo que provoca una elevada potencia específica y al desarrollo homogéneo del par motor.

El sistema VANOS doble o también denominado Bi-VANOS es la denominación que se da al sistema que se explica anteriormente con regulación en ambos árboles de levas (admisión, escape).

Se puede apreciar en el siguiente gráfico como la variación de la apertura de las válvulas se da en ambos árboles variando de este modo la apertura de las válvulas de admisión y de escape.

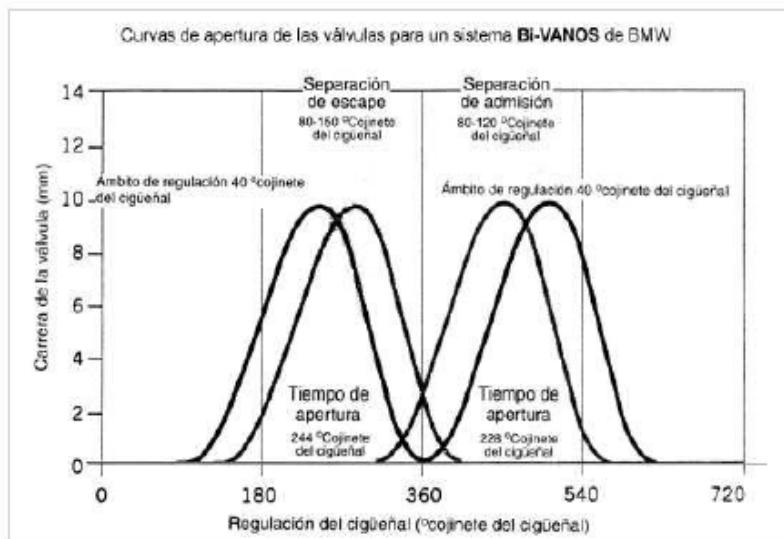


Imagen 50. Curvas de apertura de válvulas en sistema BI-VANOS de BMW

#### 4.2.2.2.1.3.-Sistema VarioCam [49]

Porche [50]: Utilizó en sus modelos 968 [51] y en las primeras series del 996 Carrera [52] un sistema (VarioCam) para variar los tiempos de distribución un tanto peculiar.

El mecanismo hidráulico controlado por la unidad electrónica de control según el régimen de vueltas del motor empuja con dos patines y abre la cadena, que mueve los árboles de levas, provocando su desplazamiento y por lo tanto se produce un reajuste de los tiempos de apertura y cierre de las válvulas de admisión. Al reducir el número de vueltas del motor los muelles repliegan el mecanismo de empuje de la cadena a su posición inicial. Este dispositivo se monta sobre una distribución de 4 válvulas por cilindro y se complementa con un sistema de distribución variable.

Este sistema de distribución variable es controlado por una señal eléctrica que envía señales de la centralita de inyección (ECU) hacia un actuador que empuja unos patines que tensan la cadena de distribución.

La regulación de la distribución se hace siguiendo unos parámetros:

Para regímenes inferiores a 1500 rpm, las válvulas de admisión abren 7° después del PMS y cierra 52° después del PMI. Con estos parámetros, el motor funciona con un giro uniforme a bajas rpm, y la emisión gases sin quemar es muy baja debido a que no existe cruce de válvulas.

Para regímenes comprendidos entre 1500 y 5500 rpm, el árbol de levas de admisión recibe un avance de 9° respecto al de escape. Esto significa que las válvulas de admisión abren 8° antes del PMS y cierran 37° después del PMI. Con este diagrama se consigue un buen llenado de los cilindros y un aumento del par motor.

A partir de 5500 rpm, el árbol de admisión vuelve a la posición inicial, es decir, apertura 7° después del PMS y cierra 52° después del PMI. Como vemos esto es una contrariedad, pero es debido a que la alta velocidad de entrada de los gases de la mezcla necesitan un mayor retraso al cierre de admisión para aprovechar su inercia y lograr que entre más cantidad de mezcla en los cilindros.

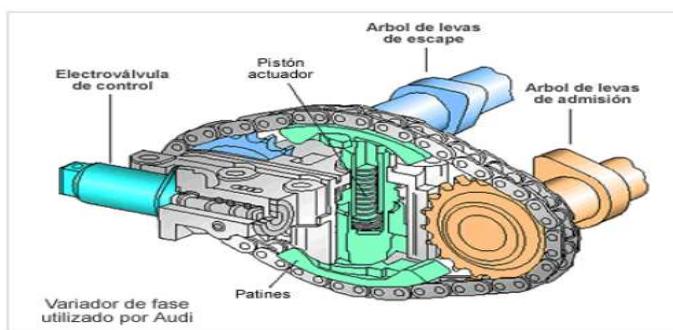
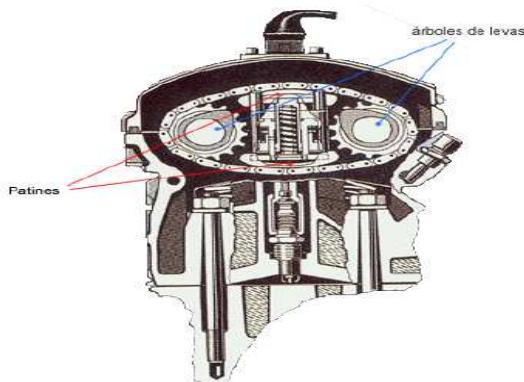


Imagen 51. Sistema VarioCam

Este sistema de distribución cambia el momento en que abren y cierran las válvulas de admisión pero el ángulototal de apertura permanece invariable.  
 Las válvulas de escape cuyos tiempos de distribución permanecen constantes, tienen un adelanta a la apertura de escape (AAE) de  $31^\circ$  y un retraso al cierre de escape (RCE) de  $1^\circ$ .

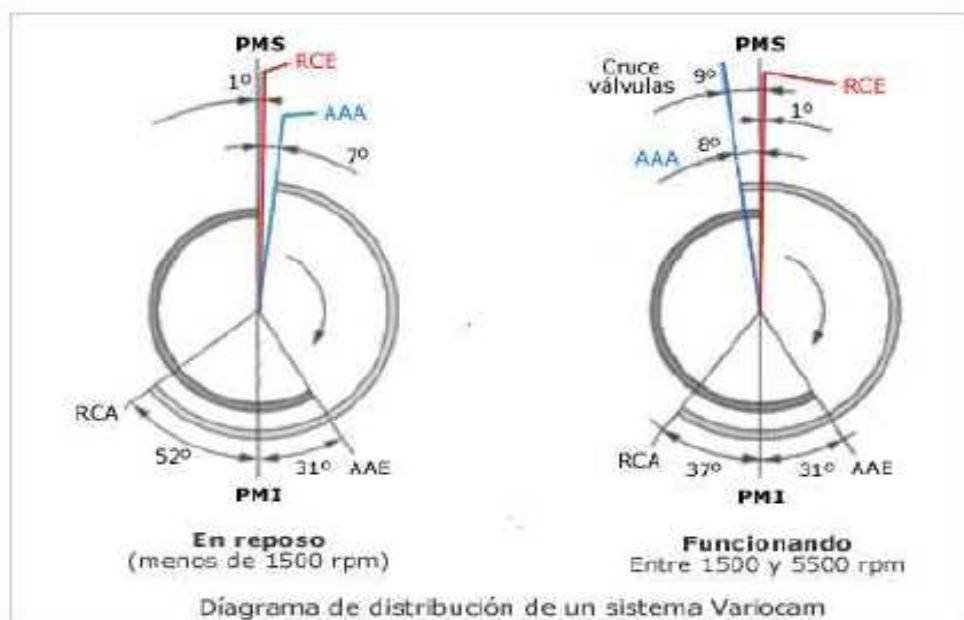


Imagen 52. Diagrama de distribución de un sistema VarioCam

Audi [53] A3 [54] 1.8l 5V y 2.8 V6: este motor utiliza un sistema parecido al anterior donde se varian los tiempos de distribución actuando sobre el árbol de levas de admisión.

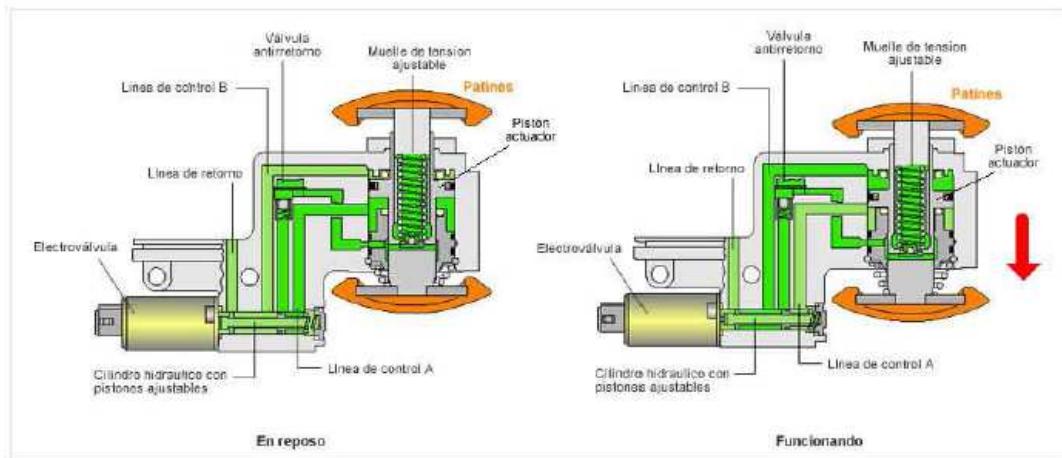


Imagen 53. Funcionamiento del variador de fase

En la posición de reposo la "línea de control A" esta abierta y el aceite a presión actúa sobre el "pistón actuador" por debajo del "pistón actuador", por lo tanto no hay variación en la apertura de las válvulas de admisión.

Por encima de las 1300 rpm la "línea de control B" esta abierta y el aceite a presión actúa por encima del "pistón actuador" que empuja los patines hacia abajo, con lo que se adelanta la apertura de las válvulas de admisión.

A partir de 5000 rpm, el árbol de admisión vuelve a la posición inicial, es decir se retrasa la apertura de las válvulas de admisión. Esto se debe a que la alta velocidad de entrada de los gases necesita de un mayor retraso al cierre de admisión, para aprovechar su inercia y lograr que entre más cantidad de mezcla en los cilindros. Este variador de los tiempos de distribución cambia el momento de apertura y cierre de las válvulas de admisión pero el ángulo total de apertura permanece invariable.

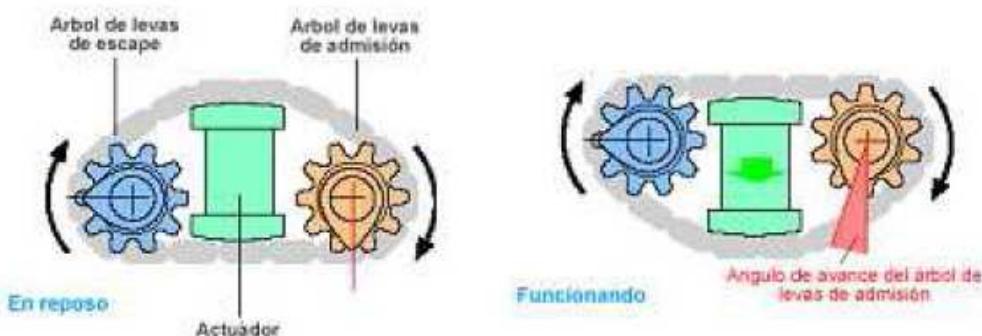


Imagen 54. Funcionamiento variador de fase

#### **4.2.2.2.1.4.-Sistema Valvetronic [55]**

El sistema Valvetronic de BMW combina la regulación de los tiempos de distribución (VANOS doble) con una regulación continua de la carrera de las válvulas de admisión.

El árbol de levas no actúa directamente sobre la palanca de arrastre que, por su parte acciona la válvula, sino que actúa sobre una palanca intermedia. Sin embargo, esta palanca intermedia no se encuentra en posición horizontal debajo del árbol de levas sino que está ubicada en posición vertical junto a dicho árbol.

La palanca intermedia está dotada en el centro de un rodillo que está en contacto con la leva (árbol de levas).

El extremo inferior de la palanca intermedia está apoyado sobre el rodillo de la palanca de arrastre, mientras que en la parte superior está apoyada en un eje excéntrico dotado a su vez de un segundo rodillo.

Cuando gira el árbol de levas, la palanca intermedia ejecuta un movimiento pendular, para conseguir que este movimiento horizontal se transforme en un movimiento vertical, la palanca intermedia tiene en su parte inferior un perfil sumamente complejo que, a primera vista, tiene forma de bumerang, ya que la mitad del perfil transcurre casi paralelamente a la palanca de arrastre, mientras que la otra mitad tiene un ligero ángulo.

Sólo cuando la parte en ángulo actúa sobre el rodillo de la palanca de arrastre presionándola hacia abajo, se abre la válvula.

La relación de la palanca ha sido definida de tal modo que tan sólo aproximadamente la mitad de todo el perfil que tiene forma de bumerang actúa sobre la palanca de arrastre. El principio y el final de esa mitad son determinados por el fulcro de la palanca de desviación.

Es aquí donde interviene el árbol de excéntrica accionado por un motor eléctrico: si aplica presión sobre el rodillo superior de la palanca de desviación en dirección del árbol de levas, cambia el fulcro de la palanca y, en consecuencia, cambia también la parte efectiva del perfil en forma de bumerang. De esta manera es posible variar de modo continuo la carrera de la válvula de admisión, teóricamente desde las posiciones completamente cerrada hasta completamente abierta.

Este es el principio de funcionamiento del sistema VALVETRONIC.

Cuando el motor ha de entregar su máxima potencia, la alzada de las válvulas es alta de modo que descubren una mayor sección de paso al aire, facilitando su entrada a los cilindros. Si se le hace funcionar a cargas bajas, la alzada se reduce, de forma que la sección de paso es menor, limitando de este modo la entrada de aire. La alzada de las válvulas puede variar desde los 0 a los 9,7 milímetros, en función del aire necesario para la combustión.

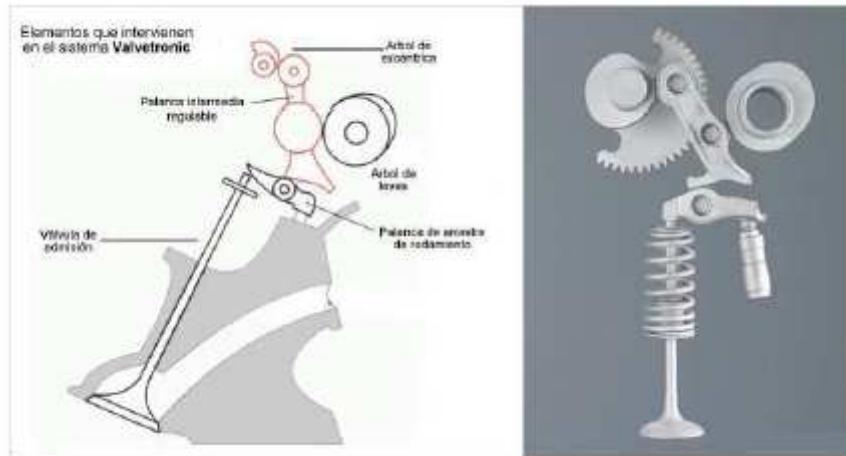


Imagen 55. Sistema Valvetronic

Si el llenado de los cilindros del motor no se controla por medio de una válvula mariposa, sino por medio de una carrera variable de las válvulas, se puede mejorar el rendimiento del motor otto en aproximadamente un 10%, porque ya no es necesario aspirar en contra de la depresión existente en el múltiple de admisión.

Para la fabricación del sistema valvetronic de BMW se utilizan unos valores de tolerancias muy reducidos. Para garantizar que todas las válvulas de admisión tengan siempre el mismo grado de apertura, se funden, durante el montaje de la culata, cada uno de los conductos por separado. Si se producen desviaciones, deben sustituirse las piezas mecánicas de accionamiento. Cuantos más cilindros (bancadas de cilindros) tenga un motor, más difícil resultara esa tarea. Además de la complejidad del montaje es considerable, por lo cual se trata de un sistema de distribución muy caro.

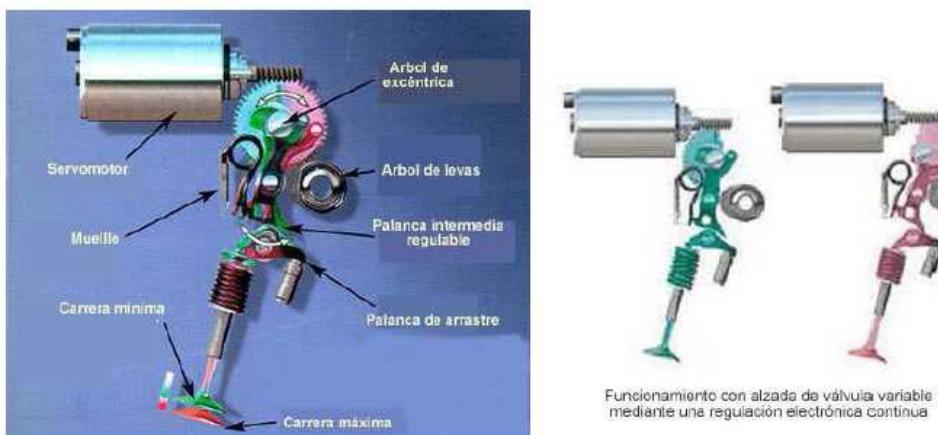


Imagen 56. Alzada variable mediante regulación electrónica continua

El sistema Valvetronic de BMW combina la regulación de los tiempos de distribución (VANOS doble) con una regulación continua de la carrera de las válvulas de admisión. Un servomotor eléctrico torsiona el árbol de excéntricas que forma la base de apoyo para la palanca intermedia, que actúan sobre las palancas de arrastre.

Un procesador de 32 bits, físicamente independiente de la centralita del motor (ECU), controla el movimiento del motor eléctrico, que coloca estos actuadores intermedios, en la posición requerida. El tiempo necesario para cambiar la carrera de las válvulas desde la mínima a la máxima alzada es de 300 ms, el mismo que necesita el sistema de distribución variable Bi-VANOS, en ajustar los tiempos de apertura.

La regulación del caudal de aire de entrada se sigue consiguiendo a costa de introducir una restricción a su paso por las válvulas de admisión, y por tanto, de unas ciertas pérdidas por bombeo, pero las pérdidas a través de las válvulas de admisión del motor Valvetronic son menores que la suma de las que se producen en la válvula del acelerador y las de admisión de un motor convencional.

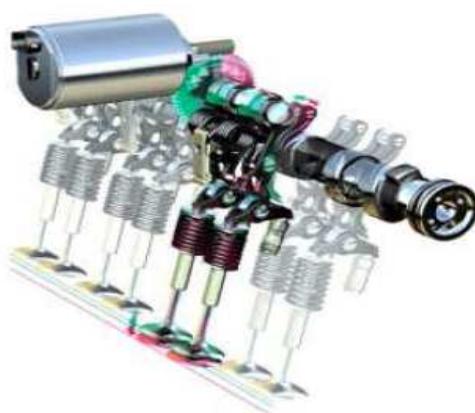


Imagen 57. Variación alzada de válvulas con el sistema Valvetronic

Únicamente para funciones de diagnóstico y en caso de avería del sistema, el motor Valvetronic de BMW sigue equipando una válvula de mariposa convencional a la entrada del conducto de admisión, que en condiciones normales permanece completamente abierta, ofreciendo una resistencia despreciable a la entrada del aire.

Con este sistema BMW asegura una reducción de consumos, menos emisiones contaminantes sin necesidad de recurrir a catalizadores especiales y una notable mejoría en el agrado de conducción.



Imagen 58. Sistema Valvetronic en motor

#### **4.2.2.2.1.5.- Sistema Vario Cam Plus [56]**

Porsche adopta un sistema de distribución variable cambiando la alzada de las válvulas por medio de empujadores de vaso invertido cambiables.

Este sistema lo utilizó por primera vez para el Carrera turbo [57] del año 2000 y, posteriormente, también para los motores por aspiración. Para la marcha en vacío y para una carga reducida son los empujadores de vaso invertido dobles (concéntricos) los que funcionan sobre una leva plana con una carrera de la válvula de solo 3 mm. Si la carga es superior, el sistema cambia a 2 levas más inclinadas con una carrera de válvula de 10 mm. Simultáneamente, la marca Porsche aprovecha la posibilidad de la regulación de fases (variación de los tiempos de distribución) del árbol de levas de admisión (de ahí la palabra PLUS de la denominación del sistema), para optimizar la separación y el solapamiento.

Porsche utiliza la abreviatura CVCP para el regulador continuo del árbol de levas que funciona con pistones de desplazamiento axial (turbo) o reguladores equipados con alabes.

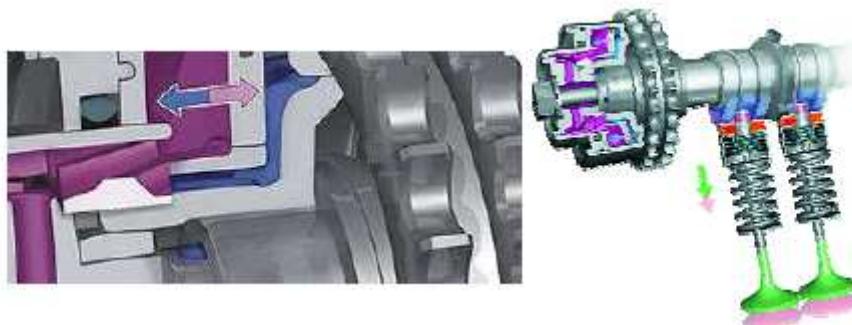


Imagen 59. Funcionamiento sistema Vario Cam Plus

El sistema de control de la carrera de válvulas consta de empujadores de vaso invertido cambiables controlados por una electro válvula de 3 vías. Los áboles de levas cuentan con levas de diferentes tamaños.

Según las necesidades del motor, el sistema se adaptará proporcionando la carrera de las válvulas más adecuada a esta situación. Se utilizan dos empujadores concéntricos, que pueden bloquearse por medio de un pequeño bulón. El interior tiene contacto con la leva pequeña y el exterior con la leva grande. En el mecanismo va integrado además un sistema para el reglaje hidráulico del juego de válvulas.

Los empujadores de vaso invertido cambiables son una obra maestra de la mecánica de precisión. La regulación de la carrera de la válvula funciona como sigue; para la transmisión de 2 carreras diferentes de las válvulas se ha subdividido el empujador de vaso invertido en una carcasa externa y en otra interna situada concentricamente en el interior de la externa.

El mecanismo de cierre que se localiza en la zona del empujador de vaso invertido propio de la leva permite el acoplamiento de control hidráulico de la carcasa interna y de la externa por medio de la presión del aceite del motor.

Una válvula de inversión electrohidráulica da admisión a los pistones de bloqueo, que dan lugar a un acoplamiento de las 2 piezas del empujador al alcanzar una presión de aceite de, como mínimo de 1,2 bar.

#### Carrera pequeña de la válvula:

- Los empujadores funcionan sin acoplamiento.
- El empujador interno y la leva central (plana) son determinantes para la carrera.
- El empujador interno también soporta el elemento para la compensación hidráulica del juego de las válvulas.
- El empujador externo se mueve con relación al empujador interno y dependiendo de la curva de elevación de la válvula de las dos levas externas realiza, por así decirlo, un movimiento en vacío, es decir, no acciona la válvula. Además existe un muelle débil de la carrera del pistón diferenciadora que es el que garantiza el contacto con las levas.

#### Carrera grande de la válvula:

El empujador interno y el empujador externo están acoplados. Pero es el empujador externo el que determina la carrera del pistón y el que sigue las curvas de elevación de las 2 levas externas. La disposición doble de las 2 levas altas también sirve para reducir la presión superficial y para evitar el momento basculante.

El sistema de distribución denominado "VarioCam Plus" consta de cuatro válvulas por cilindro, elementos de regulación de los árboles de levas (convertidores de fase) y empujadores de vaso invertido. Las cuatro válvulas de cada cilindro están dispuestas en forma de "V" con un ángulo de 27,4 grados. Para reducir las masas oscilantes en el mecanismo, los vástagos de las válvulas tienen un diámetro de seis milímetros. A diferencia del 996 Carrera, dispone de dos muelles por válvula.

Este sistema optimiza la potencia y el par en todos los regímenes, ayuda a reducir el consumo y las emisiones y a mejorar el confort de marcha del motor.

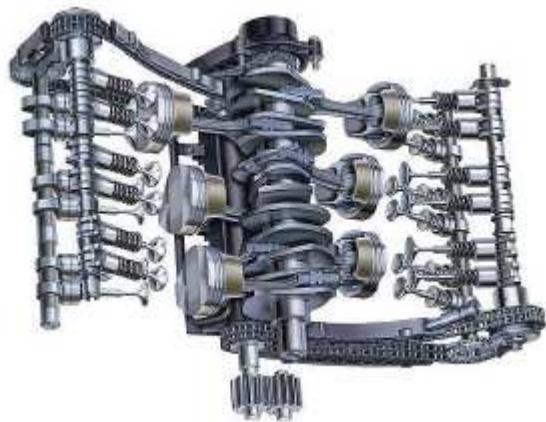


Imagen 60. Sistema VarioCam Plus en motor Boxter

El sistema VarioCam Plus está formado en realidad por dos mecanismos que se complementan; la distribución variable mejora el funcionamiento del motor al ralentí al accionar la leva pequeña (carrera de 3 mm) y ajustar un pequeño cruce de válvulas. En función de la longitud de la carrera de válvulas disminuyen los rozamientos internos en el mecanismo de distribución. Los tiempos cortos de apertura permiten además una combustión de la mezcla en los cilindros más homogénea y eficaz. Los niveles de consumo y emisiones son hasta un diez por ciento más favorables, mejorando al mismo tiempo la estabilidad de giro del motor al ralentí. Para mejorar los niveles de consumo en carga parcial, es conveniente aprovechar la recirculación interna de gases de escape.

El sistema de distribución variable conecta en este caso un cruce de válvulas más amplio, con carrera corta de las válvulas de admisión, con lo que se alarga el tiempo disponible para aspirar gases desde el colector de escape.

En condiciones de plena carga, el conductor del 996 Turbo deberá alcanzar los máximos niveles de par y potencia. La carrera de válvulas es en este caso de diez milímetros, con tiempos de apertura y cierre adaptados. Pero el sistema Porsche VarioCam Plus ofrece otras propiedades, notables en el momento del arranque: con bajas temperaturas, la fase de calentamiento es más rápida y las emisiones contaminantes, por lo tanto, más bajas.

Tanto la distribución variable como el control de la carrera de válvulas están controladas por la unidad de mando del Motronic ME7.8 [58], que ha sido diseñada específicamente con una capacidad de proceso más alta. El sistema VarioCam Plus requiere numerosos parámetros para su control, como por ejemplo el régimen del motor, la posición del acelerador, temperatura de aceite y agua y detección de la marcha acoplada. El sistema compara los deseos del conductor en cuanto a potencia y par en un momento dado con los contenidos de su memoria.

En milésimas de segundo, el ordenador decide si debe intervenir el VarioCam Plus, en caso afirmativo, las operaciones de regulación y ajuste son efectuadas de forma imperceptible.

Las ventajas de este método (VarioCam Plus) para el control variable de la alzada de las válvulas las encontramos en los costes relativamente bajos del sistema, en el peso reducido y en una estabilidad superior del número de revoluciones (en comparación con el sistema Valvetronic de BMW). Si bien tampoco se consigue con este sistema el objetivo de un control de la carga completamente libre de estrangulaciones, si que se aprovecha una gran parte de las ventajas que tiene.

Además se puede realizar una desconexión total de las válvulas por medio del empujador de vaso invertido (carrera de la válvula cero), lo cual puede aprovecharse para la desconexión del cilindro o la anulación del conducto. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que, en tal caso, solo se dispone de un perfil de leva.

#### **4.2.2.2.1.6 .-Sistema VVT (cambio del overlap)**

Toyota, Daihatsu [59] y Hyundai [60] tienen uno de los sistemas más comunes que se encuentran actualmente en algunos de los vehículos que vemos en nuestro entorno.

Las siglas VVT significan variación de tiempo valvular ( Variable Valve Timing)

Las ventajas de este sistema radican en:

- Economía de combustible ya que utiliza solamente el necesario.
- Menor contaminación ambiental.
- Aumento en la potencia del motor, mejorando el llenado de los cilindros.

Cuando el motor funciona al ralentí la válvula de obturación se encuentra totalmente cerrada, por lo que se genera un gran vacío en el múltiple de admisión.

Por lo tanto en un motor sin VVT cuando se produce el traslape valvular, cierta cantidad de gases quemados ingresan al múltiple de admisión, creando en este un empobrecimiento de la mezcla que llenara los cilindros durante la carrera de admisión y a la vez tenemos un ralentí inestable.

Para corregir esta deficiencia lo que se hace en los motores convencionales es aumentar las RPM del motor enriqueciendo la mezcla en ralentí, por lo que obtiene un mayor consumo de combustible.

Con el uso del VVT lo que se consigue es retrasar la apertura de las válvulas de admisión y así evitar que los gases quemados ingresen al múltiple de admisión y a la vez se evita enriquecer la mezcla durante el ralentí. Es entonces donde encontramos la primera ventaja del VVT que es más economía de combustible ya que el motor puede funcionar a muy bajas RPM.

Cuando se acelera el motor para hacer una salida, el VVT adelanta el tiempo de apertura de las válvulas de admisión en un grado mayor del que se establece en un motor sin VVT.

En ese momento se puede pensar que la entrada de los gases de escape afectaran el rendimiento del motor, pero no es así, ya que las RPM del motor aumentaran, y más bien los gases de escape pueden dar ciertas ventajas tales como:

- Reducción del esfuerzo de los pistones cuando viajan del PMS al PMI, permitiendo un mejor llenado de los cilindros.
- Los gases que no se han quemado aun en el escape (CO y HC) retornan al conducto de admisión por lo que la contaminación por CO y HC se reduce obteniendo emisiones más limpias.
- Además de lo anterior, los gases de escape al regresar por el cilindro, provocan que la cámara de combustión se enfrié evitando la producción de NOx, obteniendo también emisiones más limpias. Es así como aparece la segunda ventaja del VVT que es la producción de emisiones más limpias.

Cuando el motor funciona a altas RPM, los pistones viajan a una velocidad mayor, cómo por ejemplo cuando se adelanta a otro vehículo. En un motor convencional ese tiempo está preestablecido limitando el llenado de los cilindros durante la carrera de admisión.

En un sistema con VVT se consigue que el adelanto de la apertura de las válvulas de admisión sea mayor permitiendo un mejor llenado de los cilindros.

Si bien es cierto con el adelanto de apertura de las válvulas se sigue también el adelanto de cierre de estas, pero ocurre que a pesar de ese adelanto de cierre, los cilindros ya se han llenado por completo.

Aparte de esto, cuando el motor gira a altas velocidades en el escape se genera vacío, el cual evita que los gases de escape ingresen al múltiple de admisión, por lo que se consigue que los cilindros se llenen con una mezcla favorable de aire y combustible, dando como resultado una generación de potencia máxima que es la tercera ventaja del VVT.

La computadora del sistema recibe las señales de los sensores de posición del cigüeñal, del sensor del árbol de levas y otros sensores, para que luego de que estas han sido procesadas, envíe señales de activación y de desactivación a la válvula de control de aceite para adelantar o retrasar el tiempo de apertura de las válvulas de admisión a través del control de VVT.

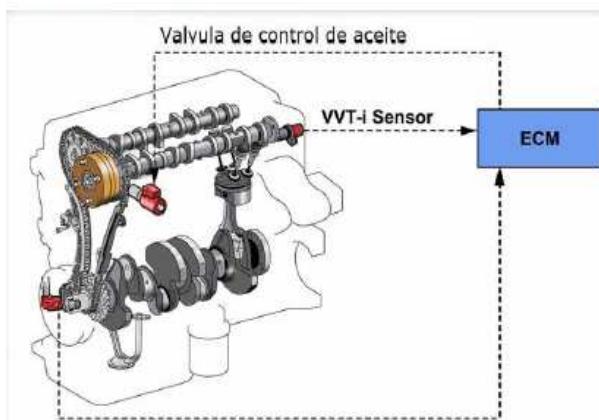


Imagen 61. Lecturas captadas en el sistema VVT y mandadas a Unidad de Control

### Funcionamiento del VVT

El controlador del VVT es una envoltura que es impulsada por la cadena de distribución y una paleta que esta fijada al árbol de levas mediante un tornillo.

Entre la envoltura y la paleta se forman cámaras en las cuales se va alojar el aceite del motor para ocasionalmente que el árbol de levas gire a la derecha o la izquierda, según sea la dirección en que dirija el flujo de aceite la válvula OCV, para adelantar el tiempo de apertura de las válvulas de admisión. Además el controlador posee un pasador, llamado pasador de bloqueo que tiene la función de producir un bloqueo entre la paleta y la envoltura, mientras el circuito es llenado por completo.

De este modo se evita el golpeteo de la envoltura y la paleta durante el arranque del motor.

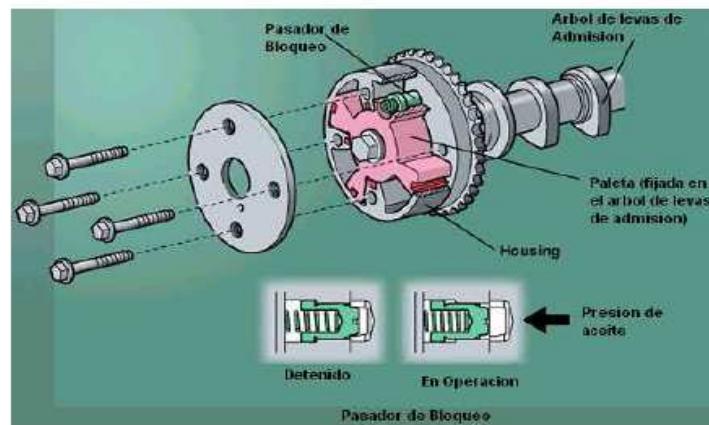


Imagen 62. Sistema VVT

Avance:

En este estado las señales de activación son más anchas que las señales de desactivación, por lo que la OCV se mueve, permitiendo que las cámaras de aceite que generan el desplazamiento del controlador se llenen de aceite y la paleta se mueva a la derecha y transmita este movimiento de avance al árbol de levas.

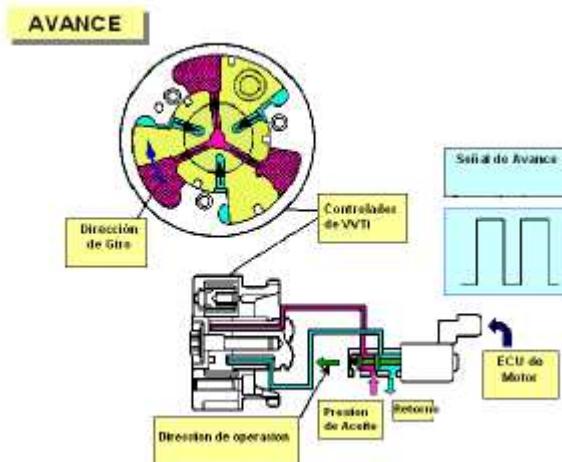


Imagen 63. Avance en sistema VVT

Cuando la válvula OCV está colocada de la forma que se muestra en la Imagen 63 por medio de la señal de avance recibida por la computadora, la presión de aceite resultante se aplica en la cámara de paletas del lado de avance de distribución para hacer girar el árbol de levas en dirección de avance.

**Retardo:**

En este caso las señales de activación de la OCV son más angostas que las señales de desactivación, por lo que la OCV se mueve hacia atrás, permitiendo que las cámaras de aceite de retraso del controlador se llenen de aceite y la paleta se mueva a la izquierda y transmita este movimiento de retraso al árbol de levas.

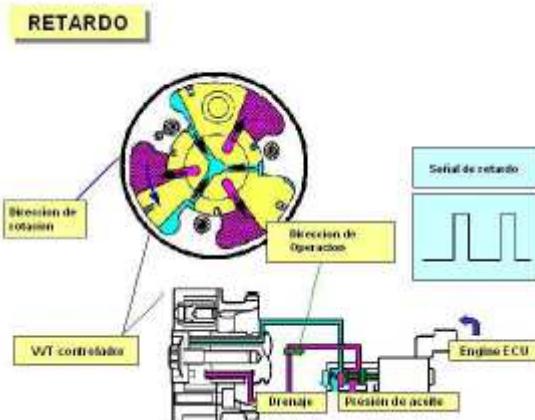


Imagen 64. Retardo en sistema VVT

Cuando la válvula OCV esta colocada de la forma que se muestra en la Imagen 64 por medio de la señal de retardo recibida por la unidad de control, la presión de aceite resultante se aplica en la cámara de paletas del lado de retraso para hacer girar el árbol de levas en dirección correspondiente.

**Retención:**

En esta condición podemos observar que las señales de activación y de desactivación tienen una anchura igual por lo que ambas cámaras de avance y de retraso son llenadas por igual y que la válvula OCV toma una posición neutral manteniendo una distribución fija.

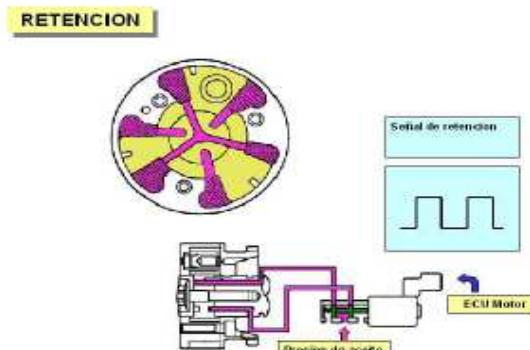


Imagen 65. Retención en sistema VVT

#### **4.2.2.2.2.- Alzada de levas Variable**

##### **4.2.2.2.2.1.-Sistema VTEC de Honda**

Siglas de Variable Valve Timing and Lift Electronic Control System.

Honda [61] presentó en el año 1989 un sistema para la variación de los tiempos de distribución, en el cual los árboles de levas no se torsionan. No solo se regula la fase de apertura, sino también el tiempo y la sección de la misma. El objetivo de esta medida son leyes creadas a medida para la apertura de las válvulas para regímenes de revoluciones diferentes.

Para un número de revoluciones medio, los tiempos de apertura son más cortos y se efectúa una carrera de válvula inferior, elevando la velocidad de entrada del combustible y por tanto, también el llenado.

Para un número de revoluciones superior, los tiempos de apertura son más largos y una carrera de válvula más grande intensifica la respiración del motor, lo cual, a su vez, tiene un efecto sobre la potencia.

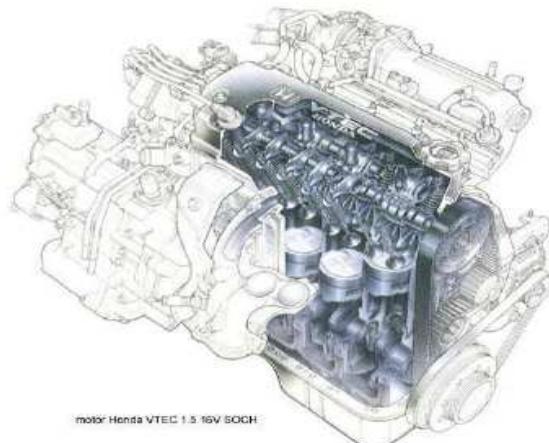


Imagen 66. Motor Honda con tecnología VTEC [62]

El método por el cual puede conseguirse este efecto, requiere de 4 válvulas por cilindro, 6 levas y 6 balancines. Las levas externas, que están asignadas directamente a las válvulas, portan perfiles suaves y la leva central tiene los tiempos de distribución más largos y la carrera de la leva más grande. En el régimen de revoluciones bajo, solo están activas las levas externas, mientras que la leva central se acciona, por decirlo de alguna forma, en vacío, es decir, no tiene efecto alguno sobre las válvulas de los balancines centrales.

Un muelle adicional evita que se pierda el contacto entre la leva y el balancín de palanca. Existen unos pasadores que se pueden desplazar de forma hidráulica y que entre 5000 y 6000 r.p.m. realizan una conexión mecánica entre los 3 balancines de palanca. Desde ese momento es la leva central más grande la que señala la apertura de la válvula. La presión de distribución necesaria para el desplazamiento la proporciona el circuito de aceite lubricante del motor.

Para que el acoplamiento de los balancines de palanca funcione bien, es necesario que los círculos de base de todas las levas sean iguales, de modo que cuando las válvulas estén cerradas los alojamientos y los pasadores estén alineados.

Honda ha demostrado la capacidad de rendimiento del sistema VTEC (DOCH) que tiene dos árboles de levas situados en la parte superior.

Resumiendo, el sistema de distribución variable empleado por Honda en sus automóviles se basa en una tercera leva en cada cilindro que entra en funcionamiento a altas revoluciones.

El balancín de esta leva no actúa a bajas revoluciones, mientras que al acelerar, la presión del aceite desplaza un vástago entre los balancines de las otras levas y el de la leva central, quedando todo el conjunto unido. En este momento los balancines son abiertos por la leva con mayor perfil (que es la central) y se incrementa el alzado de las válvulas y su momento de apertura y de cierre.

Cuando el motor reduce el régimen de giro, el vástago se recoge y el balancín central queda suelto. El perfil que ahora actúa es el de las levas exteriores. Este sistema se acopla a las válvulas de admisión y escape en los motores de doble árbol de levas (DOCH) y solamente a las válvulas de admisión en los motores de un árbol de levas (SOCH).

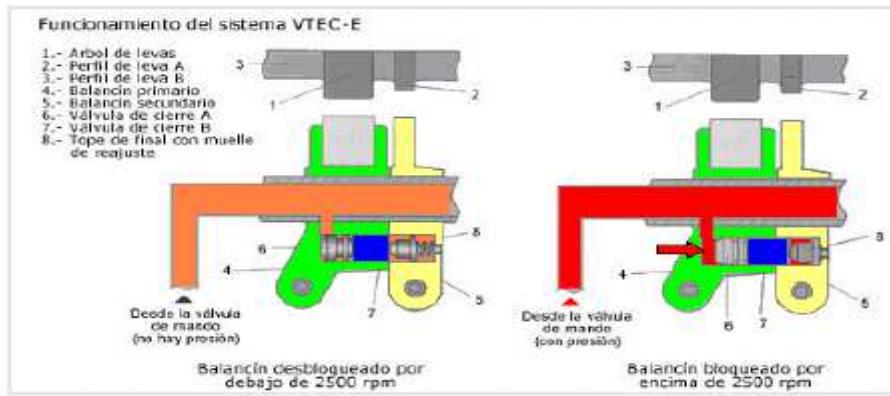


Imagen 67. Funcionamiento sistema VTEC

Dependiendo del encaje de los pernos o bulones se pueden obtener los siguientes estados de funcionamiento.

#### Estado 1.

Por debajo de las 2500 rpm y con el motor con poca carga, los tres bulones están desencajados con lo que los balancines pueden girar unos con respecto a los otros. El de más a la izquierda está apoyado sobre un anillo mecanizado en el árbol de levas, con lo que la alzada de la válvula correspondiente será nula, permaneciendo cerrada. El motor pues, estará funcionando en modo 12 válvulas (3 válvulas por cilindro).

El balancín intermedio por no estar encajado no acciona ninguna válvula. El balancín de la derecha es accionado por la leva de perfil más suave, accionando su correspondiente válvula, con lo que se obtiene un diagrama de distribución propio de un motor elástico con un rendimiento de la combustión alto.

#### Estado 2.

Al sobrepasar las 2500 r.p.m. o acelerar, se introduce presión al bulón superior, enclavándolo, con lo que los balancines extremos se hacen solidarios.

Con ello las dos válvulas de admisión son accionadas por el perfil de leva más suave, funcionando el motor en modo 16 válvulas. El motor opera en este estado desde en torno a las 2500 r.p.m. hasta las 6000.

#### Estado 3.

Cuando el motor sobrepasa las 6000 r.p.m. se manda presión al bulón inferior, haciendo solidarios los tres balancines, con lo que pasan a ser accionados por el perfil de leva de mayor alzada. Con ello se consigue una mayor potencia

#### **4.2.2.2.2.-Sistema VVTI-i (Variable Valve Timing & Lift - Intelligent) de Toyota**

El sistema VVTI-i controla las siguientes funciones:

- Control de los tiempos de distribución.
- Control mediante dos estados de funcionamiento de la alzada de la leva.
- Control tanto en el árbol de levas de admisión como en el de escape.

El mecanismo consta de un solo balancín, el cual acciona las dos válvulas de admisión a la vez. Dicho balancín es accionado por dos levas de diferente perfil, uno más suave que el otro.

El apoyo del perfil de leva mayor es un bulón al cuál se le permite un cierto desplazamiento mientras no actúe un tope que se acciona hidráulicamente.

Cuando el motor funciona a bajas y medias vueltas el tope no está accionado, con lo que el bulón sube y baja, de manera que el perfil de leva mayor no acciona el balancín, siendo las válvulas accionadas por el perfil de leva suave.

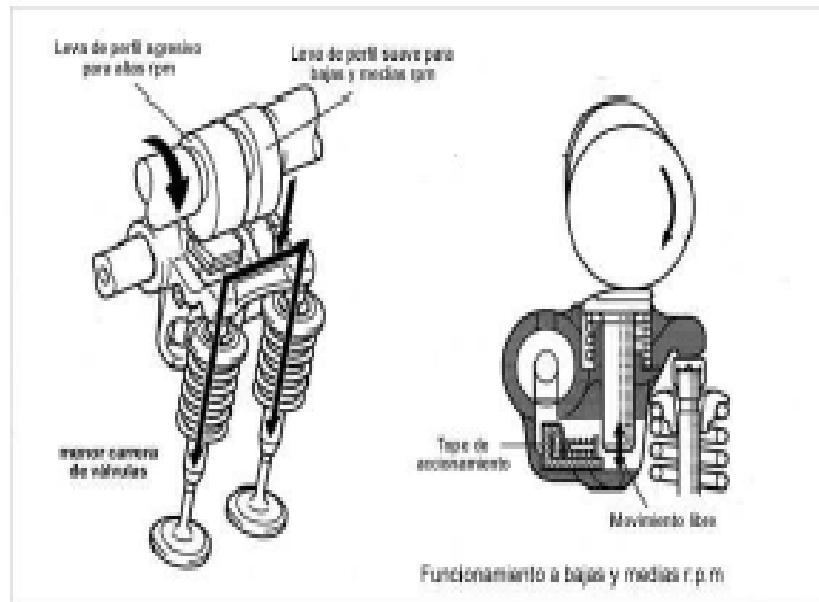


Imagen 68. Funcionamiento a bajas y medias revoluciones sistema VVTI-i [63]

A altas r.p.m., la unidad de control electrónica acciona la válvula hidráulica, con lo que el enclavamiento se acciona bloqueando el bulón, de manera que es ahora el perfil de leva mayor el que acciona a las válvulas consiguiéndose así un diagrama de distribución propio de un motor rápido.

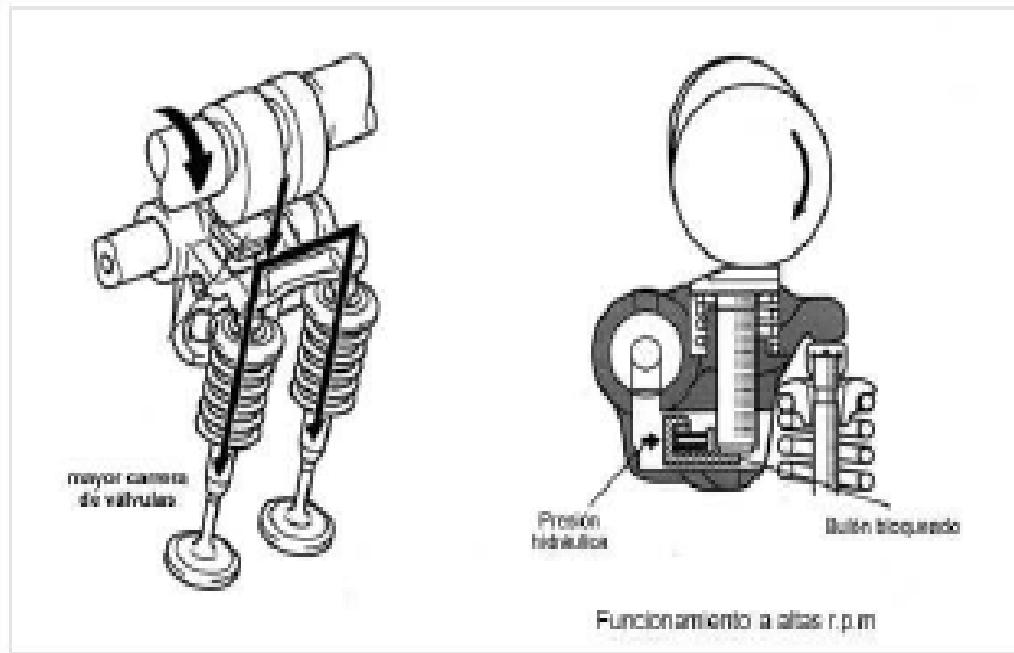
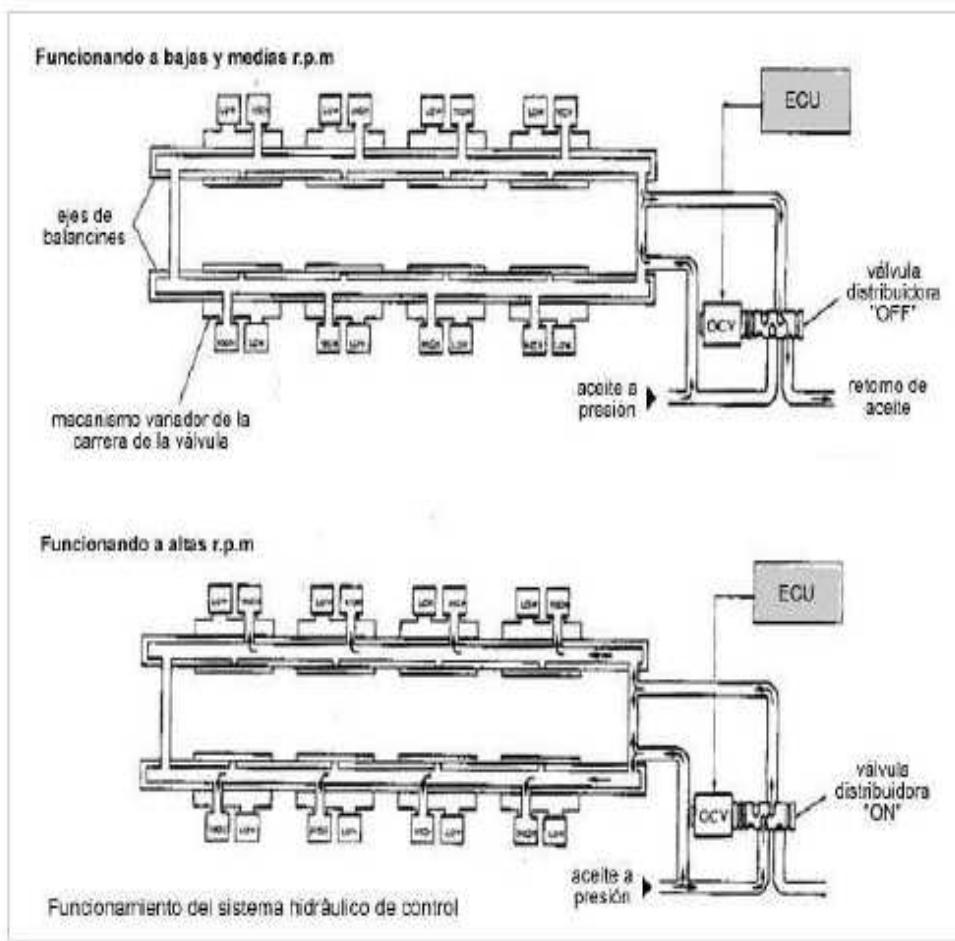


Imagen 69. Funcionamiento a altas revoluciones



	Escape					Admisión				
	Apertura AAE	Cierre RCE	Duración	centro de leva	Alzada de leva (mm)	Apertura AAA	Cierre RCA	Duración	centro de leva	Alzada de leva (mm)
Bajas R.P.M.	34°	14°	228°	110°	7.6	-10 a 33°	58 a 15°	228°	124 - 81°	7.6
Altas R.P.M.	56°	40°	276°	108°	10.0	15 a 58°	97 a 54°	292°	131 - 88°	11.2

Imagen 70. Sistema hidráulico de control y variación de parámetros en función de los revoluciones en sistema VVTi-i

Se ha demostrado técnicamente que los vehículos que poseen estos sistemas en sus motores son más económicos, generan mas potencia y contribuyen a un ambiente más sano ya que son menos contaminantes.

#### **4.2.2.2.3.- El sistema de desconexión selectiva de cilindros**

El sistema de desconexión selectiva de cilindros, es el encargado de desactivar, con el cierre de las válvulas de admisión y escape, un determinado número de cilindros, dependiendo del motor, cuando éste funciona a carga parcial. Lo cierto es que los sistemas de desactivación de cilindros no son una novedad, y han aparecido en numerosos motores a lo largo del tiempo, aunque de forma aislada y con poco éxito, pues solían estar ligados a problemas de fiabilidad. Sin embargo, con la nueva moda del downsizing y el avance de las nuevas tecnologías, algunos fabricantes como Volkswagen [64] ó la división AMG [65] de Mercedes-Benz [66] han decidido recuperarlos.

En concreto Audi lo hará a través de su motor 4.0 TFSI V8 que estará disponible a lo largo de este año 2012, en convenio con Bentley que lo implementará en su modelo Bentley Continental GT [67]. Por otro lado Volkswagen también lo implementará en modelos Seat [68], en concreto en el motor 1.4 TFSI .En el caso de Audi se comercializará en dos versiones: una de 420 CV de potencia y un par máximo de 550 Nm (para los S6 [69], S6 Avant [70] y S7 Sportback [71]) y otra de 520 CV de potencia y 650 Nm de par máximo, que será la que equipe el S8 [72].



Imagen 71. Motor 4.0 TFSI V8 de Audi



Imagen 72. Despiece del mismo motor con el Sistema de Desconexión a la vista.

Para desactivar los cilindros deben de cumplirse algunas condiciones, como que el motor no esté demasiado revolucionado y la velocidad engranada sea la tercera o alguna de las superiores.

El límite superior de par al que la desactivación tiene efecto está entre los 120 y los 250 Nm, siempre que el motor esté funcionando a una velocidad superior a la del ralentí (entre las 960 y las 3.500 rpm). En el caso del motor para Seat 1.4 TFSI, los valores son ligeramente variables, en concreto el sistema se activará para velocidades de entre 1400 y 4000 rpm y su par de entre 25 a 75 Nm, que se traduce en el 70% de las distancias de conducción.

Además, el sistema incorpora un sistema de control que monitoriza los movimientos de los pedales del acelerador y el freno y del volante efectuados por el conductor, de forma que si se detecta un patrón irregular, la desactivación de los cilindros pueda ser inhibida.

Una vez desactivados los cuatro cilindros correspondientes, en un proceso que no supera los 300 milisegundos, el V8 comienza a funcionar como un V4 con un orden de encendido variable. En los cilindros desactivados los pistones continúan moviéndose, por lo que antes de cerrar completamente las cámaras de combustión se introduce en ellas aire fresco a baja presión que reduce la energía necesaria para moverlos.

Gracias a esta tecnología se reduce el consumo una media de un 5% y las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen de 10 a 12 g/km. Además, combinado con el sistema Start and Stop que equipan los modelos de la gama S de Audi, pueden llegar a disminuir hasta 24 g de CO<sub>2</sub> por kilómetro. Según Audi, en casos concretos, como a velocidades próximas a los 80 km/h, la ganancia de eficiencia es de un 12%, y se mantiene hasta el 7% incluso a velocidades que superan los 130 km/h.

Para evitar ruidos molestos y posibles vibraciones generadas por la desactivación de los cilindros, la empresa alemana ha desarrollado dos sistemas denominados Active noise control (control activo de ruidos) y Active engine mounts (soportes activos del motor).

El primero registra los ruidos del interior del vehículo gracias a los micrófonos de ambiente que van incorporados en el coche, y los analiza en busca de posibles sonidos molestos. De esta forma, en caso necesario, el sistema emite un sonido en oposición al ruido a través de sus altavoces que, en teoría, anularía el ruido original.

Algo parecido ocurre con el sistema destinado a reducir las vibraciones molestas: si los sensores detectan vibraciones procedentes del motor, se inicia una contravibración hasta que la original se vuelva casi imperceptible.

### **Funcionamiento:**

Para entender el sistema de desconexión de cilindros, y ya que en su mayoría se han implementado en motores Audi, hay que explicar otro sistema desarrollado por la compañía que hace posible el funcionamiento adecuado del anterior, el Audi Valvelift System [73].

El Valvelift System es un sistema cuya eficiencia se basa en un control del alzado o elevación de las válvulas sumamente simple, la distribución regula de manera variable el alzado de las válvulas en dos fases. Es el árbol de levas el que acciona directamente el sistema. En cada árbol de levas de admisión se encuentran unas piezas flotantes para cada cilindro que pueden desplazarse longitudinalmente.

Cada leva cuenta con dos perfiles adyacentes, destinados a las dos longitudes de alzado de válvula posibles. Dependiendo de su posición, las válvulas de admisión se abren mediante balancines de rodillos en función de la demanda de carga solicitada.

A grandes rasgos, cada leva cuenta con dos perfiles diferentes, cuya actuación sobre la válvula depende del régimen de giro del motor. A regímenes parciales, las válvulas de admisión son accionadas por el perfil que permite una alzada asimétrica de las dos válvulas de cada cilindro, de modo que una se abre 5,7 mm y la otra 2 mm.

A plena carga, el mecanismo de desplazamiento de las piezas de leva hace que sobre las válvulas actúe el perfil de leva que permite una apertura de 11 mm. En situaciones de carga parcial, el Audi valvelift system explota todo su potencial de ahorro de combustible, lo que se aprecia especialmente cuando se circula a una velocidad media-alta en una marcha larga.

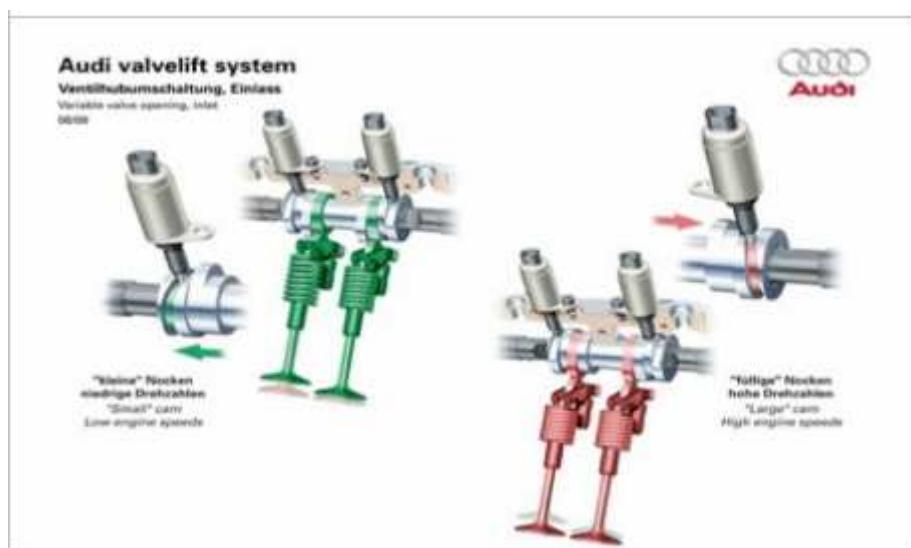


Imagen 73. Funcionamiento del Audi Valvelift System

En verde se observa la activación para regímenes bajos, con una baja elevación de las válvulas, en rojo en cambio la respuesta del sistema a altas exigencias del motor con una apertura mayor de las válvulas.

El control del sistema se hace de forma electrónica, en función de los parámetros básicos de control como son los obtenidos a través de la lectura del sensor de presión absoluta en el colector de admisión, la posición de los árboles de levas y el régimen de giro del motor, lo que evita que la referencia deba ser el caudal de aire. A regímenes en los que la presión que se genera en el colector es constante, la medición de la posición de los árboles de levas de admisión ajustables resulta de gran relevancia para la gestión del motor por la unidad de control electrónico. Ésta dispone de dos programas de trabajo para carga parcial y plena, además de un tercero para el proceso de transición entre ambas.

La señal recibida por la unidad de control en función de los regímenes de funcionamiento se transforma en corriente que llega a unas válvulas solenoides, que es un dispositivo operado eléctricamente y que se usa en otras aplicaciones para regular el paso de fluidos líquidos o gaseosos y que en este caso será la encargada de, mediante su actuador, interactuar con el perfil de leva correspondiente para generar el desplazamiento horizontal de las piezas flotantes y por consiguiente la mayor o menor apertura de las válvulas.

La adaptación del Valvelift system al sistema de desconexión selectiva es muy sencilla, y varía únicamente con respecto al sistema original en que en vez de contar con dos perfiles de leva, correspondientes a los dos regímenes posibles de funcionamiento programados en la unidad de control, contamos con un único perfil, de modo que cuando las exigencias del motor son bajas, interviene la parte de la pieza deslizante del árbol de levas que carece de perfil de leva, de modo que no activa al movimiento de las válvulas y por consiguiente se produce la desactivación de los cilindros correspondientes.

Por otro lado en el caso en que se requiere la intervención plena del motor, la válvula solenoide vuelve a intervenir, generando el desplazamiento horizontal de la pieza ya comentada que hace que las válvulas entren en contacto con la parte que tiene perfil de leva, reactivando los cilindros correspondientes y volviendo a poner en funcionamiento todo el motor.



Imagen 74. Sistema Valve Lift en bloque motor

Aquí se observa un motor con el sistema ValveLift incorporado, en la parte derecha de la imagen sobre el árbol de levas tenemos las válvulas solenoide que actúan sobre los perfiles de este.

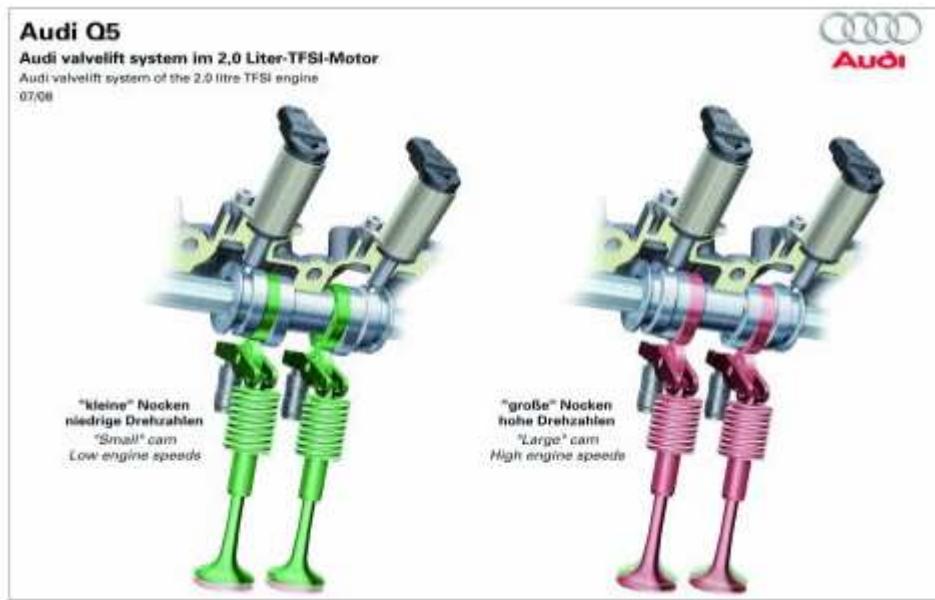


Imagen 75. Desplazamiento pieza flotante con perfles de levas en función de los regímenes del motor

Otra perspectiva del sistema comentado. Recalcar que estas imágenes pertenecen a la implementación para variar la apertura de válvulas en el caso del Sistema de Desconexión Selectiva la pieza deslizante del árbol de levas tendría esta forma:



Imagen 76. Desplazamiento axial de la pieza flotante cambiando el perfil de leva en contacto

En verde, el perfil de leva actuando sobre la válvula cuando se encuentra inactivo, a la derecha, en rojo, interviene la parte de la pieza sin perfil bloqueando el movimiento de la válvula y activando el sistema.

El desplazamiento de la pieza deslizante que incorpora los perfiles de leva para el correcto funcionamiento del sistema es raíz de un ranurado puntual del eje:



Imagen 77. Eje ranurado sobre el que se coloca la pieza flotante

Que permite que la pieza flotante que se encuentra ranurada internamente, engrane con él:



Imagen 78. Pieza flotante encajada axialmente con el eje

La pieza flotante tiene dos orificios internos que permiten que se limite su movimiento a través de una bola de acero solidaria a un pequeño resorte que se encuentra alojado en otra cavidad perteneciente al eje, de modo que al desplazarse la pieza sobre el eje el resorte se comprime y la bola pasa al otro orificio limitando el movimiento en ese sentido.

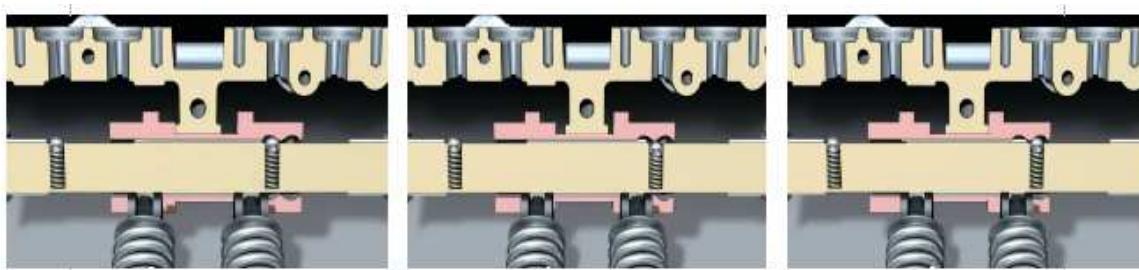


Imagen 79. Muelle interno en el eje ranurado, para asegurar la correcta colocación

El uso de este sistema repercute en un disminución notable de los gases de escape, por otro lado la eficiencia en el consumo genera, que, por poner un ejemplo a 50 km/h ,en tercera o cuarta, el ahorro de combustible ascienda a 1 litro a los 100 km y todo ello manteniendo la potencia, ya que si el motor necesita más, es el propio sistema el que con un simple movimiento de acelerador reactiva el motor para que este funcione a pleno rendimiento.

Los tipos más comunes que hay actualmente en nuestro país son:

**Por desplazamiento del árbol de levas**

BMW	VALVETRONIC
BMW	VANOS
Toyota	VVT
Hyundai	CVVT
Daihatsu	DVT

**Por Alzada de levas variable**

Toyota	VVT
Honda	VTEC
Mitsubishi	MIVEC
Volkswagen	SISTEMA DE DESCONEXIÓN SELECTIVA DE CILINDROS (CYLINDER ON DEMAND)

## **4.2.3.- Sistemas de admisión variable**

### **4.2.3.1.- Introducción**

En este apartado del proyecto se van a tratar de analizar los sistemas de admisión variable.

El sistema de admisión variable se utiliza para mejorar la entrada de aire a los cilindros en dependencia del régimen al que se encuentre el motor, mejorando directamente el par motor a esos regímenes y en consecuencia las prestaciones de motor.

Los colectores de admisión convencionales no disponen de la flexibilidad, con la que cuentan los colectores de admisión variable, para adaptarse a los distintos regímenes del motor.

Con los colectores de admisión convencionales se consigue un par motor elevado a un numero de revoluciones bajo o una potencia elevada para un numero de revoluciones alto, pero no se consigue las dos condiciones a la vez, por eso la necesidad de un sistema eficaz para todos los regímenes de funcionamiento del motor.

Los sistemas de admisión variable generalmente se utilizan en motores con cuatro válvulas por cilindro para compensar la falta de par motor a bajo numero de r.p.m..

Los tubos de admisión en motores con carburador o con inyección monopunto, necesitan, para una distribución uniforme de la mezcla de aire-gasolina, tubos cortos individuales de igual longitud para cada cilindro, lo que imposibilita diseñar un sistema de admisión variable optimo para estos motores. Al contrario en los motores con sistemas de inyección multipunto, donde el combustible es inyectado en el tubo de admisión o directamente en la cámara de combustión (inyección directa) a muy poca distancia delante de la válvula de admisión. En estos sistemas los tubos de admisión transportan solo aire lo que permite un buen diseño de los tubos para mejorar la admisión de aire.

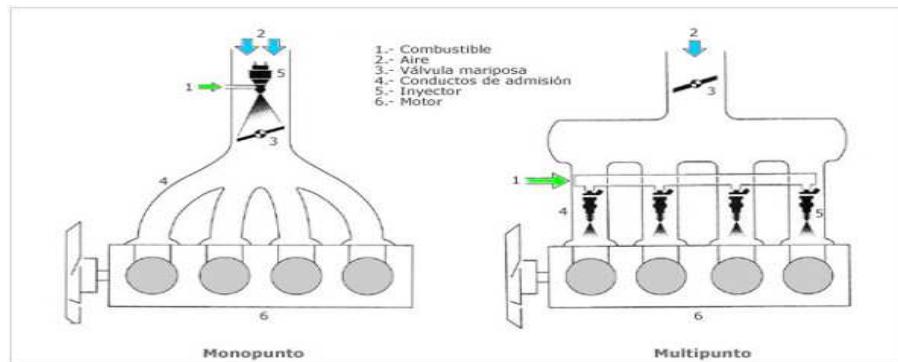


Imagen 80. Inyección monopunto y multipunto

Las dimensiones de los tubos del colector de admisión deberían adaptarse al número de revoluciones del motor. Lo ideal sería disponer de sistemas de aspiración ajustables en continuo, en los que los conductos se alargaran y encogieran, para poder graduar la longitud de los tubos desde la válvula de admisión del motor hasta el colector. Estos sistemas de aspiración ajustables en continuo son muy complicados, caros y difícil de fabricar.

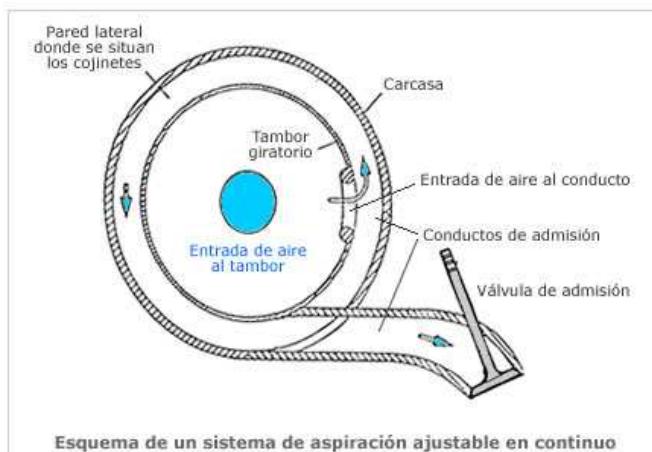


Imagen 81. Sistema de aspiración ajustable en continuo

En estos últimos años se han hecho grandes progresos. La marca Audi, por ejemplo, ha sustituido en su motor V8 el múltiple de admisión con tubos variables de dos fases (tubo largo y estrecho para bajas r.p.m. y tubo ancho y corto para altas r.p.m.) por otro de tres fases. Honda también utiliza para sus motores V6 un sistema de aspiración de tres fases.

Pero fue BMW la que se atrevió, con la introducción de su motor V8 con Valvetronic de la serie 7 (año 2001), siendo el primer fabricante que instaló un sistema de aspiración continuo.

Está formado por una carcasa de magnesio, a la cual también se han montado externamente las toberas del combustible y de inyección. La geometría interna tan compleja del engranaje de velocidad variable, fabricado de material plástico, solo pudo llevarse a cabo gracias a la aplicación de sofisticadas tecnologías. La pieza compleja gira sobre rodamientos y experimenta torsión por medio de un servomotor eléctrico. La longitud de los tubos de admisión varía de 670 a 230 mm. Hasta 3500 r.p.m. se mantiene, en principio, toda su longitud.

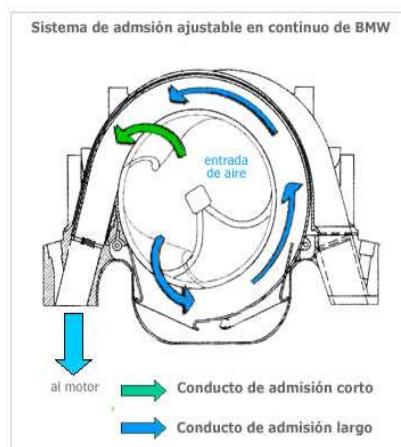


Imagen 82. Sistema de admisión ajustable BMW

La mayoría de los fabricantes de automóviles no pueden permitirse tal inversión y, por motivos económicos, prefieren los múltiples de admisión con dos fases para diferentes longitudes y secciones de los tubos de admisión. La forma que se elige para el conducto de aspiración depende tanto del modo de construcción del respectivo motor, como del número de cilindros. El número de cilindros juega un papel importante, por cuanto que determina la forma de oscilaciones y la fuerza de las pulsaciones en el sistema de aspiración.

Podemos mejorar la admisión de aire teniendo en cuenta:

-Las dimensiones de los tubos de la admisión, los conductos de admisión para instalaciones de inyección multipunto, son independientes y se unen en un depósito colector (3), comunicado con la atmósfera a través de una mariposa de paso (4).

La mejora de la admisión de aire depende de la longitud y configuración del tubo (2) y de las revoluciones del motor. Las aperturas de las válvulas de admisión crean un movimiento de aire hacia el depósito (3), donde se produce el retorno de los mismos hacia el cilindro a gran velocidad, por esta razón a estos tubos se les denomina también tubos oscilantes de admisión. Los tubos oscilantes de admisión anchos y cortos repercuten favorablemente en la admisión de aire a altas r.p.m. Los tubos largos y delgados mejoran la admisión a bajas r.p.m.

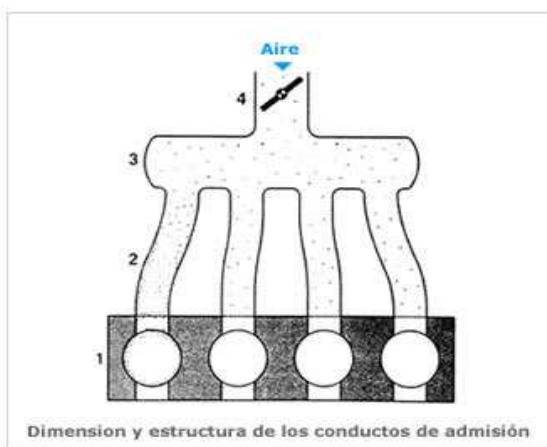


Imagen 83. Estructura de los conductos de admisión

-La estructura o configuración de los tubos de admisión, dependiendo del número de cilindros del motor, se puede estructurar un sistema de admisión tal, que mejore la entrada de aire, aprovechando el efecto de la resonancia que se produce en los conductos de admisión. El sistema de admisión para un motor de 6 cilindros en linea optimizado para aprovechar las ventajas del efecto de la resonancia, se configura uniendo los cilindros que tienen iguales intervalos de encendido mediante tubos cortos (2), a un depósito común por cada grupo (3), estos depósitos comunican con la atmósfera a través de un depósito único (5), y una mariposa de estrangulación (6) le pone en contacto con la atmósfera, la conexión entre (5) y (3), se hace con unos tubos de resonancia orientados (4), que aumentan la velocidad del aire.

La separación de los depósitos (3), de los dos grupos de cilindros (A y B) con dos tubos de resonancia impiden que se solapen los fenómenos de flujo en dos cilindros vecinos en orden de encendido. Si el orden de encendido es: 1-5-3-6-2-4 no hay dos admisiones seguidas dentro de cada depósito.

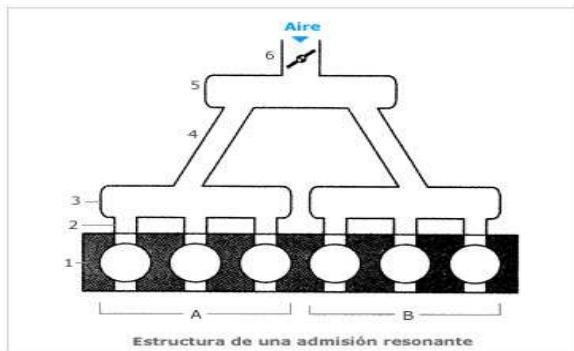


Imagen 84. Estructura de una admisión resonante

#### **4.2.3.2.- Modelos de admisión variable**

La clasificación de los modelos de admisión variable con los que nos podemos encontrar son los siguientes:

##### **4.2.3.2.1.- Admisión variable por longitud del colector**

Son generalmente los más usados, constan de dos longitudes distintas de conductos hacia el cilindro: una larga para regímenes bajos y otra corta para alto régimen. De esta forma se adapta la frecuencia de entrada del aire tanto para regímenes bajos como altos.

A medida que aumenta el régimen (numero de r.p.m.) debería disminuir la longitud y aumentar el diámetro de los conductos, de manera que se mantenga la inercia de los gases sin producir perdidas de carga.

Para conseguir una admisión variable por longitud del colector se utilizan unas mariposas, controladas electrónicamente, que regulan el paso de aire o de la mezcla eligiendo el conducto de admisión largo o corto (2 fases) según sea el número de r.p.m. del motor.

##### **4.2.3.2.2.- Admisión variable por resonancia**

Esta basada en el fenómeno vibratorio del aire de admisión, provocado por la apertura de las válvulas de los diferentes cilindros del motor, en el colector de admisión.

La frecuencia de entrada de los gases dependerá de la longitud y sección del colector y las pulsaciones originadas en los mismos facilitarán su entrada al interior de los cilindros a una presión mayor que la atmosférica.

Las ondas de presión y depresión se desplazan por el interior de los conductos con una frecuencia que varía con el régimen del motor.

Las dimensiones del colector de admisión determinan que a cierto número de r.p.m. del motor la frecuencia de las oscilaciones producen un efecto de sobrealimentación de los cilindros por resonancia.

Pero, para que la resonancia sea efectiva, los pulsos del aire que se desplazan por los colectores, tienen que llegar sincronizados, "en fase", con la apertura de las válvulas de admisión del motor.

Como las válvulas de admisión de cada pistón accionadas por el árbol de levas se abren y cierran secuencialmente y sus tiempos de cierre y apertura van variando en función de la velocidad de giro, así como varían la compresibilidad del aire y las frecuencias pulsantes, para mantener siempre sincronizada la entrada de los pulsos es necesario ir variando la geometría de los colectores (longitud y diámetro) en función de la velocidad de giro del motor.

Si se incorpora un dispositivo que varía tales dimensiones, se conseguirá mejorar el llenado a diferente número de revoluciones. Este sistema funciona añadiendo una toma adicional de aire a cada cilindro con un mando de mariposa que abra a alto régimen, puesto que se mejorará la entrada de aire de admisión.

#### **4.2.3.2.3 Sistema de admisión variable por longitud del colector**

La expresión "por longitud del colector" no tiene por qué ser siempre la variación de la longitud del colector, también se puede variar el diámetro del colector como veremos en el ejemplo siguiente.

Los motores en línea de 4 cilindros ofrecen la posibilidad de desarrollar los colectores de admisión que cumplen las características de los sistemas de admisión variable, con cuatro tubos articulados de igual longitud que desembocan en la mayoría de los casos formando un ángulo recto en un colector, en cuyo extremo abierto se sitúa la pieza de conexión para la válvula de mariposa.

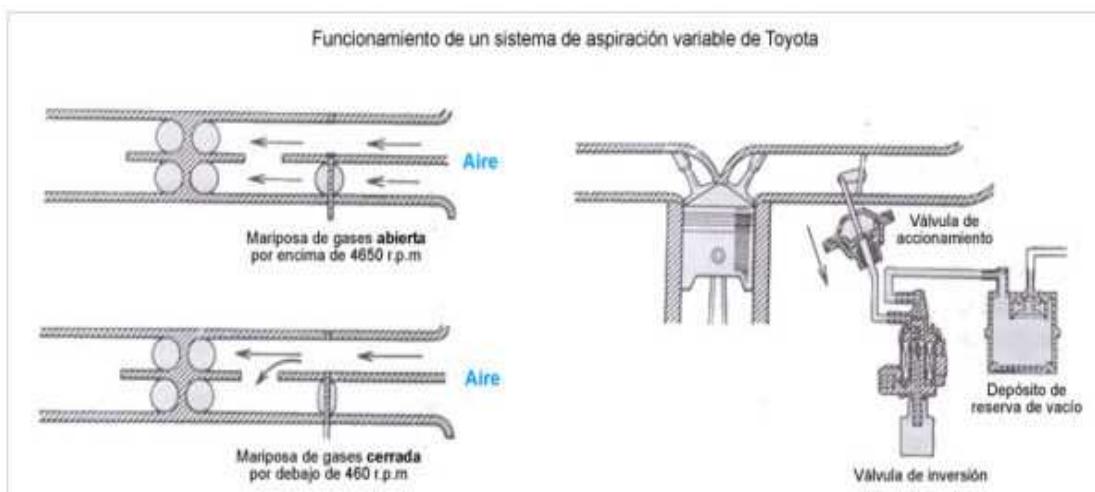


Imagen 85. Funcionamiento de sistema de aspiración variable Toyota

En la figura inferior podemos ver como seria un sistema de admisión variable por longitud de colector para un motor en "V".

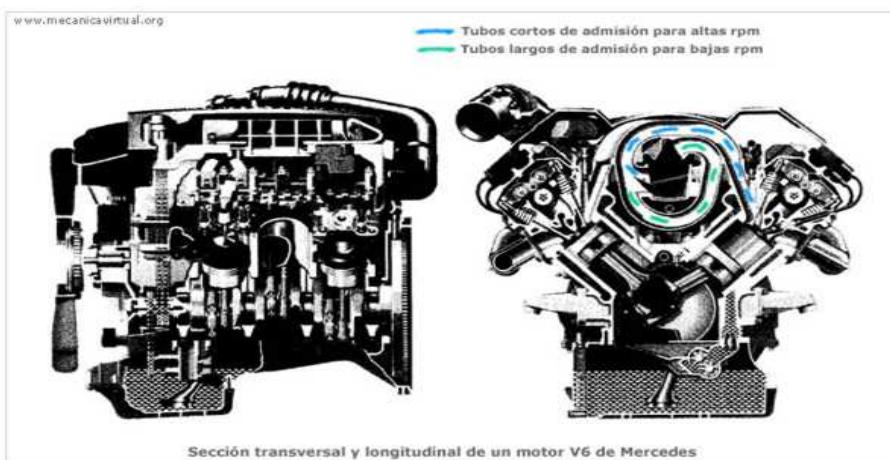


Imagen 86. Sección transversal y longitudinal de motor V6 Mercedes con admisión variable.

La admisión variable por longitud de colector, ademas de aprovechar la velocidad del aire para conseguir una mezcla más homogénea y completa, también puede aprovechar las características acústicas de los conductos de admisión, consiguiendo un efecto de sobrealimentación del motor. Para conseguir este efecto de sobrealimentación, los conductos del colector tienen que tener un diseño muy estudiado y adaptado a la cilindrada del motor y al número de r.p.m. del mismo.

Este diseño no siempre es posible ya que es costoso economicamente su fabricación y hay ocasiones, en que falta espacio en el vano motor.

Un colector que aprovecha tanto la característica de las dimensiones del colector como un diseño adecuado para beneficiarse de las características acústicas del mismo, es el utilizado por la marca Citroen [74], en sus motores multiválvulas. Este sistema de admisión se denomina ACAV (Admisión de Características Acústicas Variables) [75]. Este sistema de admisión permite mediante cuatro trampillas internas (4) obtener dos longitudes y diámetro de colectores diferentes. Estas trampillas se accionan neumáticamente (5) por medio de una electroválvula que corta o permite el paso del vacío que actúa sobre las cápsulas de vacío (5). Cuando el régimen del motor está comprendido entre 1000 y 5000 r.p.m., la electroválvula es activada, las trampillas están cerradas y el aire recorre el colector más largo (3), de forma que favorece el par.

Cuando el régimen es superior a las 5000 r.p.m., la electroválvula corta el vacío, la trampilla se abre y toma el conducto mas corto (2) a fin de favorecer la potencia máxima.

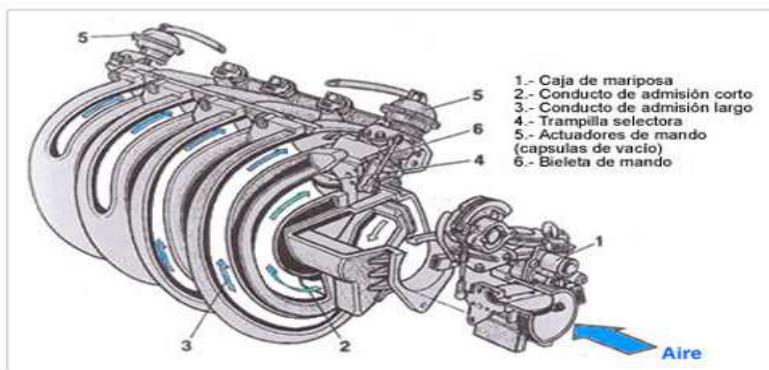


Imagen 87. Flujo del aire en sistema de admisión variable

También se utilizan sistemas de admisión variable para motores de inyección directa de gasolina. En este caso no se busca tanto, el mejor llenado de los cilindros, sino la misión de crear un flujo de aire que se adapte a los modos de funcionamiento (mezcla estratificada, mezcla homogénea) de los motores de inyección directa.

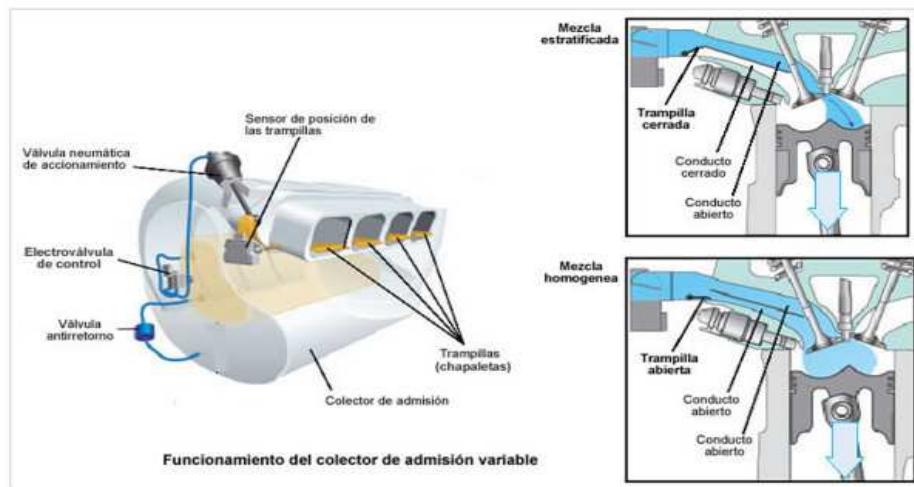


Imagen 88. Funcionamiento colector de admisión variable

#### Válvula de mariposa en el colector de admisión accionada

En los modos estratificado y homogéneo-pobre y en partes del modo homogéneo se acciona la chapaleta (válvula de mariposa) en el colector de admisión y se cierra el conducto inferior en la culata.

Debido a ello el aire de admisión fluye únicamente a través del conducto superior hacia el cilindro. Este conducto está diseñado de modo que el aire de admisión ingrese describiendo una turbulencia cilíndrica. Adicionalmente aumenta la velocidad de flujo a través del estrecho conducto superior, intensificando la formación de la mezcla.

Esto tiene dos ventajas:

- En el modo estratificado, el flujo cilíndrico del aire transporta el combustible hacia la bujía.
- En el trayecto hacia ésta se realiza la formación de la mezcla.

En el modo homogéneo-pobre y en partes del modo homogéneo, el flujo de turbulencia cilíndrica del aire respalda la formación de la mezcla. De esta forma se consigue una alta capacidad de ignición de la mezcla y una combustión estable, así como un funcionamiento con mezcla pobre.

#### Válvula de mariposa en el colector de admisión no accionada

Al funcionar a cargas y regímenes superiores en el modo homogéneo no se acciona la chapaleta en el colector de admisión, con lo cual se encuentran abiertos ambos conductos. Debido a la mayor sección de paso del conducto de admisión, el motor puede aspirar la masa de aire necesaria para la entrega de un par más intenso y una alta potencia.

#### 4.2.3.2.4.- Sistema de admisión variable por resonancia

El funcionamiento de una admisión variable resonante es como la que hemos explicado anteriormente, la única diferencia es que en vez de tener dos depósitos (3) ahora tenemos un solo depósito dividido en dos partes por una válvula mariposa resonante (7, en la Imagen 89). En la admisión variable resonante existe una combinación de los sistemas de tubo de resonancia y de tubo oscilante. Cuando la válvula mariposa resonante esta abierta (altas r.p.m.) el deposito (3) se convierte en un solo volumen. Se origina entonces un colector de aire para los tubos oscilantes de admisión cortos (2).

Cuando el régimen del motor es bajo (r.p.m. bajas) la válvula mariposa resonante esta cerrada, entonces el sistema se comporta como un sistema de admisión resonante.

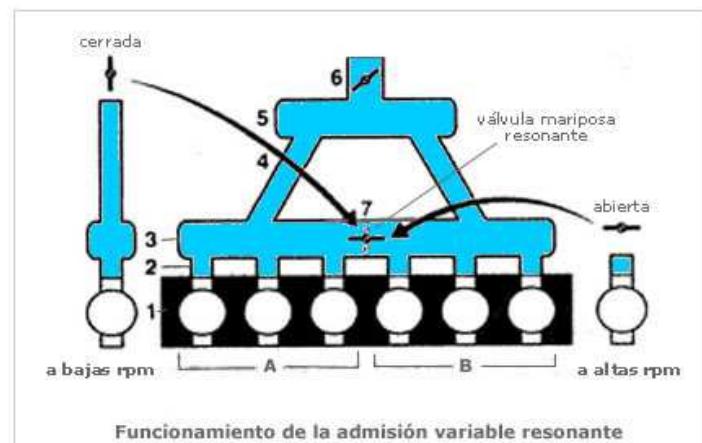


Imagen 89. Funcionamiento de la admisión variable resonante

Utilizado principalmente en motores en "V", motores de cilindros horizontales "boxter" y también en motores en linea con 6 ó mas cilindros.

En motores de mas de 4 cilindros, por ejemplo los de 6 cilindros, el efecto de sobrealimentación por resonancia se ve disminuido porque las pulsaciones de las válvulas al abrir y cerrar se compensan entre ellas en el colector. Sin embargo el sistema de admisión por resonancia funciona de forma óptima para motores de 3 cilindros, porque en ese caso una válvula de admisión se cierra, cuando la otra justo empieza a abrirse. Para aprovechar las ventajas mencionadas en los motores de 3 cilindros, en los motores de 6 cilindros se divide el colector de admisión por la mitad mediante una válvula mariposa, trabajando el motor ahora como si fuera dos motores de 3 cilindros.

Esta solución se da por ejemplo en el motor de los Opel [76] Omega 3000 [77] y Senator [78], con el sistema de admisión "DualRam".[79]

#### **4.2.3.2.5.- Sistema Dual Ram de Opel**

Por medio de un tubo de aspiración adecuado con una válvula de mariposa conmutable se divide el motor de 6 cilindros, en 2 motores de 3 cilindros cuando las r.p.m. son bajas, con esto se consigue un par motor elevado. A partir de aproximadamente 4000 r.p.m. se abre la válvula de mariposa y el modo de funcionamiento se modifica volviendo el motor a trabajar como un 6 cilindros, con esto se genera una potencia elevada. Dependiendo de la conformación y del ajuste del sistema de aspiración, puede producirse otro incremento de potencia para un numero de r.p.m. muy elevado, si se vuelve a cerrar la válvula de mariposa a partir de aproximadamente 6000 r.p.m..

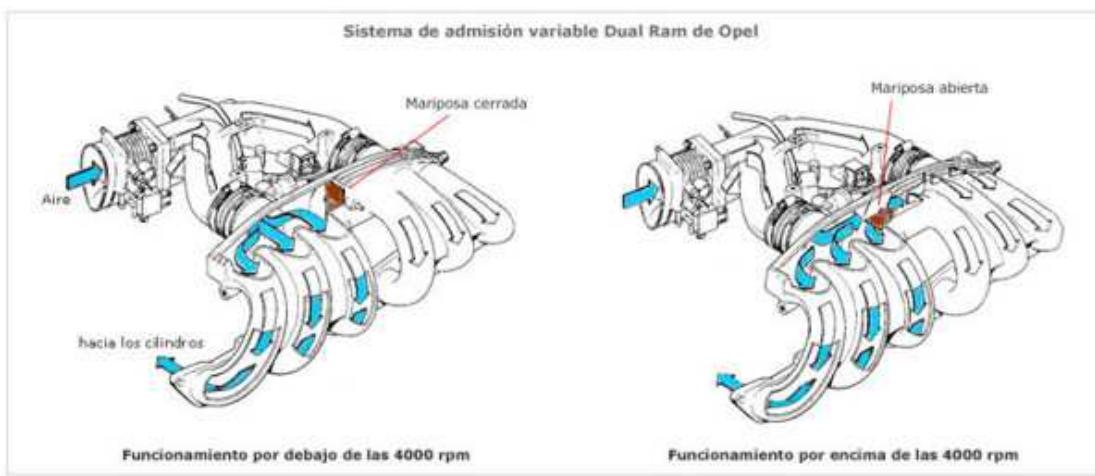


Imagen 90. Funcionamiento sistema Dual Ram Opel por encima y debajo de las 4000 rpm

La marca BMW utiliza para el motor en linea de 6 cilindros del M5 [80], 3,6 litros 315 CV, un sistema de aspiración con una válvula mariposa interna adicional. De ese modo, se aprovecha el efecto de la llamada sobrealimentación por oscilación resonante de la admisión, gracias a la cual se pueden mejorar la potencia y el par motor, si bien esto sólo es así dentro de un margen de revoluciones estrecho.

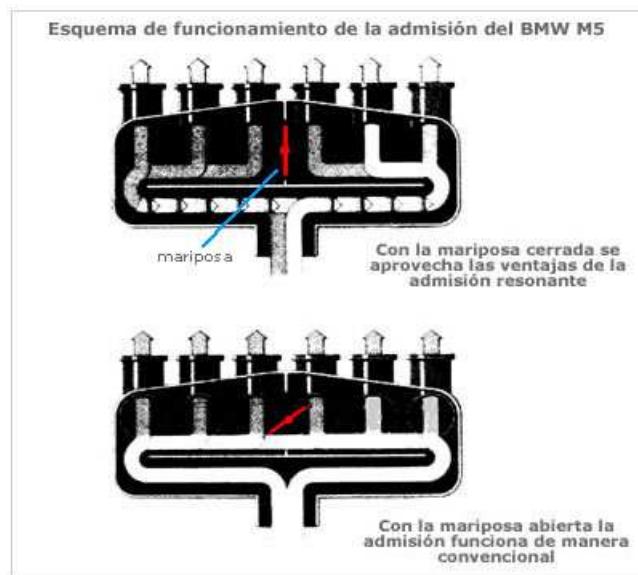
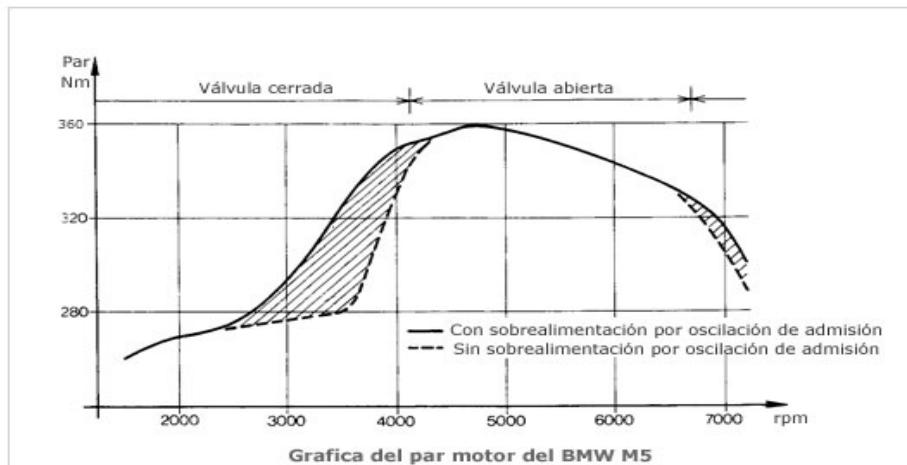


Imagen 91. Esquema de funcionamiento de la admisión en BMW M5



Gráfica 9. Par motor del BMW M5 en función de las revoluciones

Otro modelo de admisión resonante de BMW, en este caso se trata de un sistema de aspiración "diferenciado", utilizado en el motor de 6 cilindros y 3 litros de BMW (M5), con sistema de resonancia y alimentación de aire de turbulencia. Este sistema de admisión se divide en dos sistemas completamente diferentes; para altas r.p.m. y plenas cargas dispone de un sistema de admisión resonante con una válvula mariposa que regula las dimensiones del colector de admisión adaptándose al nº de r.p.m. del motor

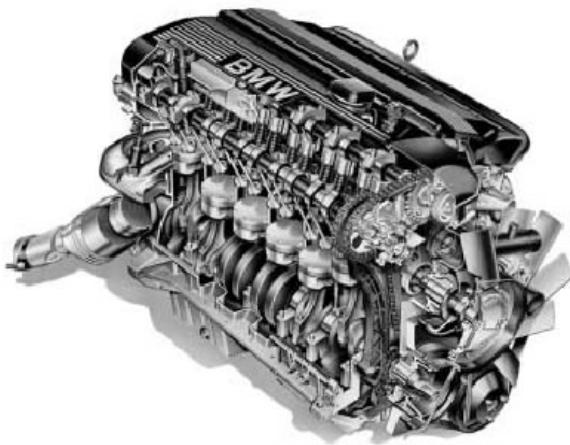


Imagen 92. Motor M5 BMW de 6 cilindros

Para bajos regímenes del motor (bajas r.p.m.) existe un sistema de admisión completamente separado del resonante, que dispone de un control propio (válvula reguladora de turbulencia) y secciones transversales reducidas, así como unos calibres de turbulencia que aumentan la velocidad del flujo del aire cuando entra en los cilindros.

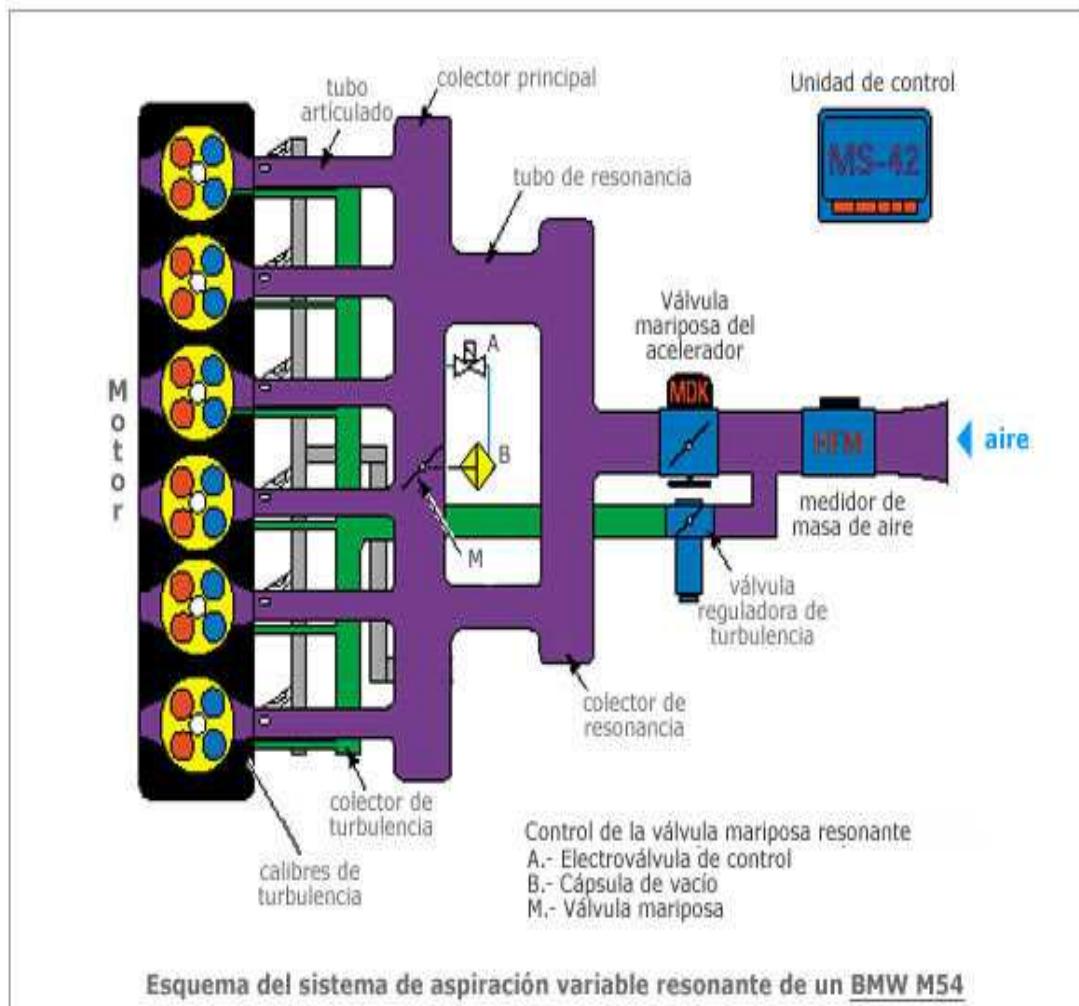


Imagen 93. Esquema del sistema de aspiración variable resonante del BMW M5

## 4.2.4 Sistema de compresión variable

### 4.2.4.1 El sistema VCR

La relación de compresión de un motor de combustión se define por la relación entre el volumen del cilindro y el volumen de la cámara de combustión:  $(V_1 + V_2) / V_1$ . En los motores convencionales, esta relación de compresión es fija, por lo tanto no se puede mejorar. El objetivo del sistema VCR (Relación de Compresión Variable) es intervenir en ella, de modo que, haciéndola variable se pueda optimizar de acuerdo a las condiciones exigidas al motor. Es obvio que esta mejora es una fuente importante de innovación, que lleva implícitos resultados muy ambiciosos.

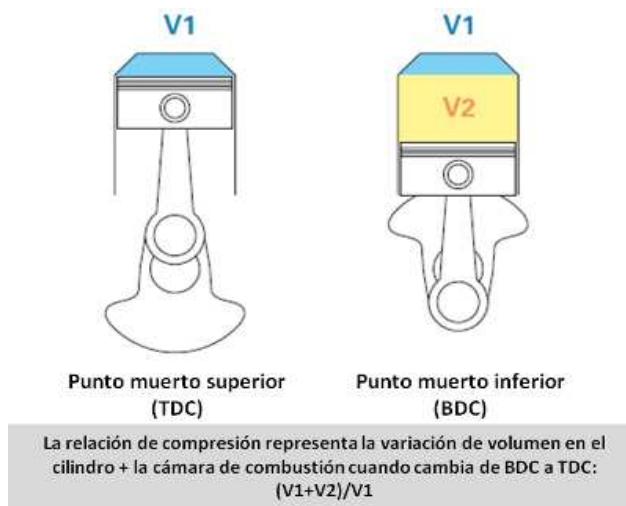


Imagen 94. Relación de volúmenes

VCR se utiliza para adaptar el volumen de la cámara de combustión a la masa del gas que se introduce en él. Por lo tanto, la relación de compresión de un motor VCR es de alta a bajas cargas y proporcionando así una mayor eficiencia durante la expansión de los gases en la cámara de combustión.

A altas cargas, durante la turboalimentación, la relación de compresión es inferior a la de un motor convencional, de modo que las condiciones de temperatura y presión se mantienen "normales" a pesar de la gran masa de gas introducido en el cilindro, por lo que la combustión se realiza de forma segura. La relación de compresión mínima permite lograr pares bajos, que no son posibles en los motores convencionales en condiciones normales.

VCR es definitivamente un factor que optimiza la eficiencia a través de la relación de expansión, la reducción de cilindrada (motores más pequeños) y la reducción de la velocidad del motor (Downspeeding).

La variabilidad de la relación de compresión de los motores VCR hace que sea posible tener "varios motores en uno". Con el motor VCR, la relación de compresión se convierte en un parámetro variable como el avance de encendido, la presión de admisión o la sincronización de las válvulas. Esta variabilidad es con el objetivo de mejorar el desempeño y la eficiencia energética o, dicho de otro modo, reducir las emisiones contaminantes y su tratamiento posterior.

VCR Flexible (continuamente controlada cilindro por cilindro) es otra etapa en el control de relación de compresión: es el punto obligatorio de paso para que el encendido por compresión (CAI / HCCI) de los motores de multi-cilindros, eficiente en un amplia rango de condiciones. La ignición por compresión es un reto grande para la reducción de contaminantes. Los motores CAI-HCCI de gasolina nunca han sido comercializados y quizás nunca lo sean a menos que se use la tecnología VCR.

Otro punto vital para el futuro: un motor VCR es, por definición, capaz de cambiar de un combustible a otro sin ninguna pérdida en la eficiencia o rendimiento, que sigue siendo óptima sin tener en cuenta el tipo de combustible. Un motor VCR es, por definición, "multicombustible".

Nos hemos centrado en el análisis de un prototipo, denominado MCE-5, que aplica el sistema VCR, sigue siendo perfeccionado pese a estar ya en el mercado, la empresa trata de buscar un compromiso entre innovación y costes, de modo este tipo de motores puedan ser usados y producidos a gran escala.

#### **4.2.4.2 Componentes**

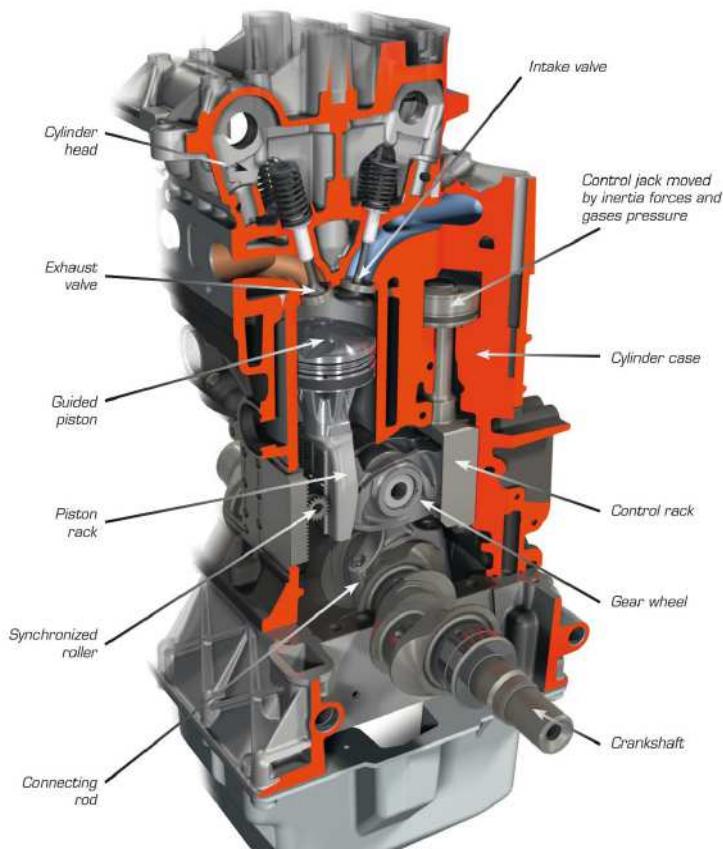


Imagen 95. Esquema del sistema VCR

##### **4.2.4.2.1.- Biela**

La dureza de la biela, es comparada en este sistema con la del pistón. La pequeña cabeza de biela está albergada en un engranaje que será el que conectará con el pistón y hará las veces de regulador mecánico de la compresión. El cuerpo de la biela tiene una sección mínima con el fin de evitar cualquier interferencia con el engranaje que la contiene.

Tiene 2 guías axiales, una en la base de la biela para guiarla respecto al eje y la otra para hacerlo respecto al engranaje.



Imagen 96. Biela del sistema VCR

La característica principal de la biela es que puede aguantar tensiones 5 veces por encima que las mayores tensiones posibles generadas en las bielas de los motores comunes. Este nivel de resistencia viene por el equilibrio de esfuerzos generados entre la propia biela y el engranaje, produciendo fuerzas libres de inercia, esto se produce por que las masas de ambos componentes son prácticamente iguales.

Los esfuerzos que en funcionamiento actúan sobre la biela, son el doble que los que se generarían en un motor Diesel a unas 6500 rpm.

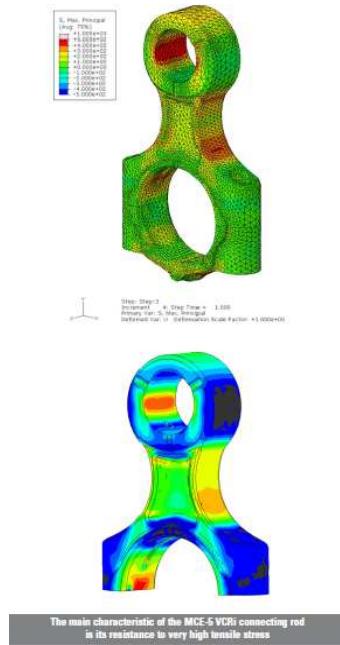


Imagen 97. Estado tensional de la biela del sistema VCR en funcionamiento

Las fuerzas de compresión son, de igual manera inferiores que las que se generan en motores Diesel operando con presiones internas en el cilindro que pueden alcanzar los 200 bar.

La lubricación de la pequeña cabeza de biela se produce mediante pequeñas hendiduras tallas en ella. Esta configuración ha sido ahora sustituida por una solución más convencional por razones de coste y debido a que la lubricación generaba unas condiciones de operación más severos produciendo mayores solicitudes en los rodamientos.

Esta modificación ha permitido que los costes de producción de este tipo de biela no varíen mucho con respecto a las bielas de producción en masa.

Aquí se expone una tabla de las características, tanto a nivel de dimensiones, de materiales, cómo de solicitudes de la biela.

Dimensions	
Entraxe (mm)	90,75
Diamètre de pied extérieur (mm)	54
Profil pied	Tête de vipère à 7,5°
Diamètre axe pied (mm)	30
Forme du pied sens axial	en double trompette (25 µ)
Forme du pied sens radial	Elliptique 22 microns de plus en horizontal
Jeu diamétral de pied (µm.H/µm.V)	64 << 75 / 42 << 53
Largeur pied (mm)	23,82
Diamètre de tête (mm)	50
Jeu diamétral de tête (µm)	12,5 << 67,5
Largeur tête (mm)	25,3
Jeu axial tête (mm)	200 << 271
Diamètre de vis (mm)	M12
Masse (g)	966
Solicitations	
Effort de compression maxi (N)	109 000
Effort de traction maxi (N)	57 600
Couple de serrage vis + angle serrage / tension résultante	30Nm + 55° = 8 500 daN
Données techniques	
Matériau	35NCD16 (35NiCrMo16)
Type / procédé de fabrication	Sécable : forgée + rectification

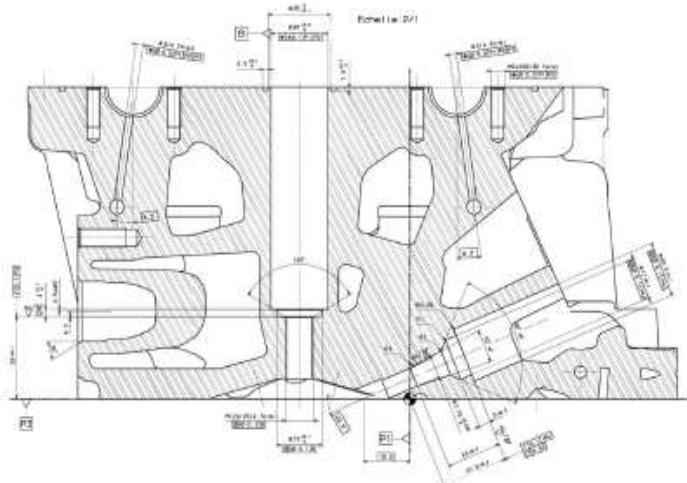
**The main characteristics of the MCE-5 VCRi connecting rod**

Tabla 9. Características técnicas de la biela del sistema VCR

#### 4.2.4.2.2.- Culata

La culata en este sistema al igual que las comunes aisla la combustión y en este caso los actuadores, que es cómo se denomina al cilindro auxiliar del sistema encargado de regular la compresión del sistema VCR, estando sometida a fuerzas 2 veces las solicitudes que suelen producirse en culatas de motores comunes.

La parte que cubre los actuadores del sistema VCR no está refrigerada y la configuración evita tener gases de escape calentando los actuadores del VCR.



The MCE-5 VCRi GDI cylinder head is equipped  
with an injector oriented at 22.5° and with a valve angle of 15°

Imagen 98. Corte de la culata

La parte de la culata que cubre los cilindros actuadores del VCR es rígida, debido a que estos cilindros son más pequeños de lo normal ( 63 mm en vez de 75 mm de diámetro) y en esta parte del bloque no existen ni válvulas, ni inyectores ni bujías.



Multi-layer steel (MLS) is used to guarantee leak tightness  
between the cylinder head and the crankcase

Imagen 99. Junta de la culata del sistema sistema VCR

El sellado entre la culata y el carter está hecha con una junta de acero multi-capa (MLS) con ajustes especiales para poder admitir las grandes presiones de aceite generadas.

La junta suele operar a las condiciones normales de los motores convencionales.



Imagen 100. Bloque motor sistema VCR

La tabla de abajo muestra las características de la culata.

Dimensions and main features	
Height (mm)	124
Width (mm)	300
Lenght (mm)	443
Weight (g)	14,118
Intake & exhaust valves angle (°)	15
Intake valve diameter/lift (mm)	28.6 / 9.0
Exhaust valve diameter/lift (mm)	26.5 / 9.5
Injector angle (°)	22.5
Material	AS7G

**The main characteristics of the MCE-5 VCRi cylinder head**

Tabla 10. Características técnicas de la culata

#### **4.2.4.2.3.- Cárter**

El cárter alberga dos filas de cilindros, una está dedicada a la combustión, mientras la otra es la encargada de los actuadores reguladores de la compresión.

Es importante resaltar que únicamente están refrigerados los cilindros de la combustión.

El cárter del sistema VCR asemeja un motor en U cuyas 8 cámaras están cubiertas con la misma culata.

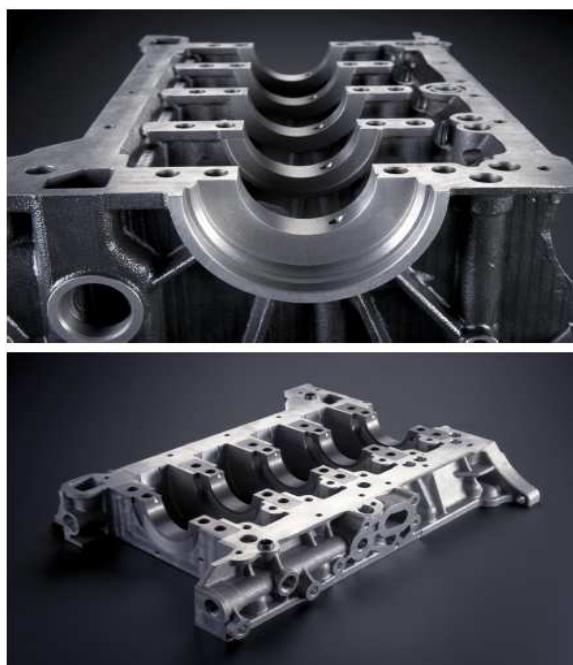
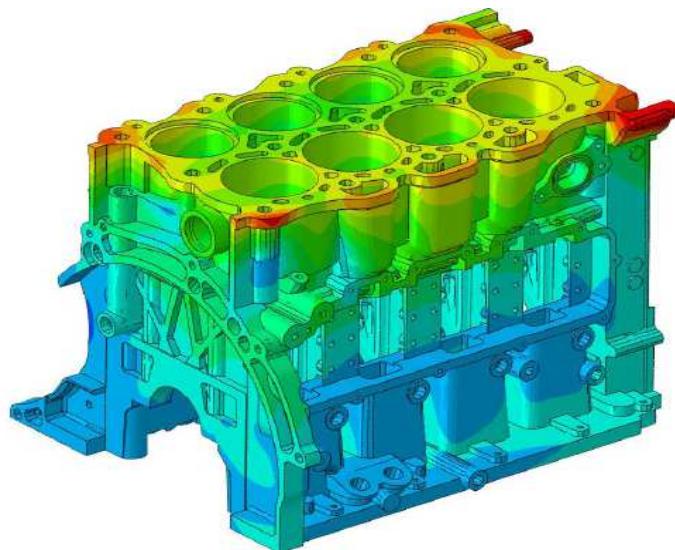


Imagen 101. Cárter sistema VCR

Conductos de alta presión (40 a 60 bar) están localizados en el cárter, para recircular el aceite entre la parte superior e inferior de las cámaras de los actuadores cilíndricos.

La longitud y la anchura de carter del 1.5 L es comparable con un motor convencional con la misma capacidad volumétrica. La altura es el único punto desfavorable, ya que es similar a la de un Diesel de 2L, esta altura viene generada como consecuencia de los pares que se producen.



The MCE-5 VCRi aluminum crankcase will be ready for 2011.  
Fully equipped, this crankcase weighs 52 kg less than the current cast iron version

Imagen 102. Estado tensional del bloque motor

Main data	Cast iron - 2010	Aluminum - 2011
Height from bearing line to top deck (mm)	253.65	253.65
Lenght from rear to front plane (mm)	432.10	428.60
Overall width (mm)	382*	393
Inter bore (mm)	86	86
Combustion/control bores center-to-center distance	100	100
Weight - cylinder case alone (kg)	69.134	24.600
Weight - cylinder case fully equipped** (kg)	83.086	31.272
Material	Cast iron GLB1	As7G

\* with bed plate

\*\* included: bed plate, bearing caps, screws, liners

The main characteristics of the MCE-5 VCRi crankcase

Tabla 11. Diferenciación entre el cárter de aluminio y de fundición

#### **4.2.4.2.4.- Cigüeñal**

El cigüeñal tiene la mitad de radio de muñequilla que un cigüeñal ligado a un pistón de igual tamaño que el que se usa en esta aplicación, como resultado está doblemente cargado que un cigüeñal de un motor gasolina convencional.



The MCE-5 VCRi crankshaft has a crank radius half that of a conventional engine with the same piston stroke



Because of its high natural rigidity (big bearings overlap), the MCE-5 VCRi crankshaft no longer requires counterweights

Imagen 103. Diseño del cigüeñal del sistema VCR

El cigüeñal está soportado por una línea particularmente rígida de rodamientos situados en el cárter.

Trabajar en condiciones de altas cargas como un motor Diesel corriente hace que el entorno de producción y operación de ambos sea similar, está forjado y soportado por rodamientos capaces de soportar altas presiones.



Imagen 104. Cigüeñal del sistema VCR sin contrapesos de equilibrado

Una de las características básicas es que el forjado de este cigüeñal resulta más sencillo debido a su pequeño tamaño y la eliminación de contrapesos de equilibrado, que requieren un desplazamiento sustancial del material forjado respecto al centro de gravedad. Por ello es de un 30 a un 35 % más ligero que el cigüeñal de un motor con la misma cilindrada.

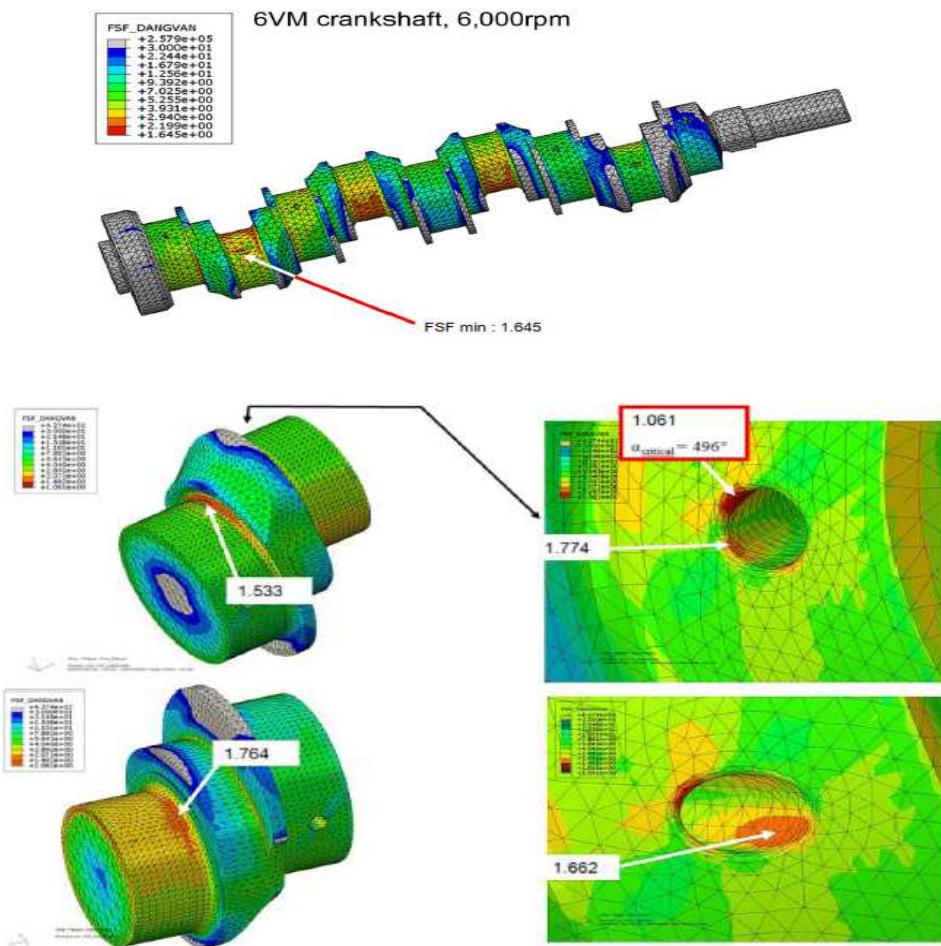


Imagen 105. Estado tensional del cigüeñal

Dimensions	
Interbore (mm)	86
Crank lenght (mm)	21
Crank pin diameter (mm)	50
Main bearing diameter (mm)	60
Bearing N°2 axial clearance (mm)	70 < < 181
Main bearing diametral clearance ( $\mu\text{m}$ )	45 < < 95
Weight (g)	10,400
Operating conditions	
Maximal crank stress (N)	108,000
Maximal main bearing stress (N)	70,000
Production technical data	
Material	GKH
Production process	Forging + grinding

The main characteristics of the MCE-5 VCRi VCR crankshaft

Tabla 12. Características técnicas de cigüeñal

#### **4.2.4.2.5.- Cremalleras**

Exceptuando el engranaje, las cremalleras son la parte más compleja del sistema VCR. La cremallera más compleja es la del pistón, es parte es ligera, precisa y su morfología es muy diferente de la cremallera del actuador de control de compresión (control rack), debido a que es móvil y en el caso de la cremallera de control es fija.

La mayoría del trabajo lo recibe esta cremallera, saliendo beneficiada la cremallera del actuador de control que se ve sometida a acciones menores.

El peso ha sido recientemente optimizado pasando de 1400 a 900 gramos con la misma deformación bajo carga y tensines máximas (Mpa).

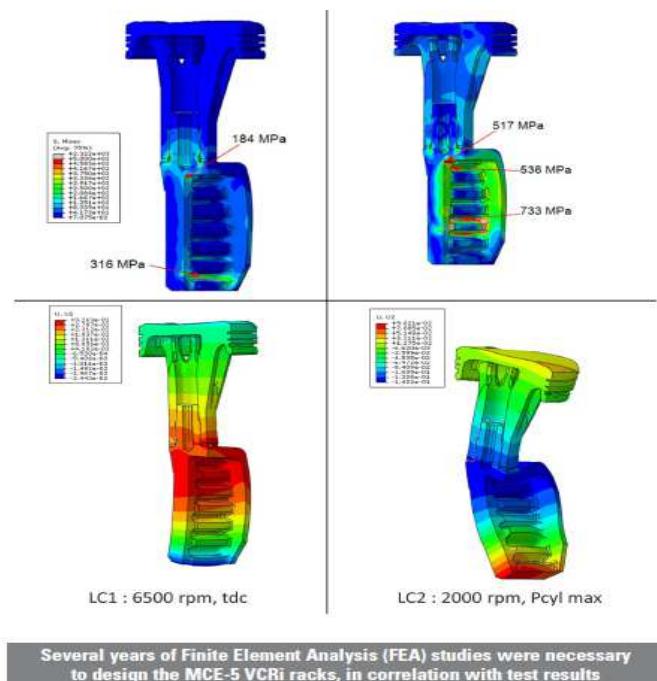


Imagen 106. Estado tensional de la cremallera del pistón en sistema VCR

Otra dificultad añadida a la cremallera del pistón es que no hay posibilidades de mecanizarla fácilmente, rectificarla o esmerilarla para mejorar los acabados, por ello, y debido a que los altos esfuerzos que la solicitan (57000 N) de fuerza tangencial debido a los 130 bar de presión producidos por el cilindro, hacen necesaria su fabricación con acero al carbono endurecido con excelentes propiedades mecánicas. A pesar de todo no es excesivamente compleja, ni cara su fabricación.



Imagen 107. Diseño de la cremallera del pistón

Combustion rack	
Dimensions	
Number of teeth	6
Module	3.33
Pitch (mm)	10.472
Overall width (mm)	63
Height (mm)	81
Weight (g)	401
Operating conditions	
Maximum stress in the part (MPa)	840
Max longitudinal stress (N)	53,000
Max radial stress (N)	33,000
Max acceleration (g)	2,400
Production technical data	
Material	acier de cémentation 15MCD5 (15MnCrMo5)
Surface treatment	cémentation (profondeur 0.8mm)
Mass production process	forging, cutting, precision electrochemical machining, grinding

VCR control rack	
Dimensions	
Number of teeth	6
Module	3.33
Pitch (mm)	10.472
Overall width (mm)	63
Height (mm)	177.1
Weight (g)	906
Operating conditions	
Maximum stress in the part (MPa)	830
Max longitudinal stress (N)	53,000
Max radial stress (N)	20,000
Production technical data	
Material	acier de cémentation 15MCD5 (15MnCrMo5)
Surface treatment	cémentation (profondeur 0.8mm)
Mass production process	forging, cutting, precision electrochemical machining, grinding

The main characteristics of the MCE-5 VCRi racks

Tabla 13. Características técnicas tanto de la cremallera anexa al pistón, como del engranaje

En las dos tablas superiores se analiza el dentado y las características mecánicas de la cremallera, la primera tabla es la referente a la cremallera del cilindro de combustión, y la segunda al actuador de control de compresión.

#### 4.2.4.2.6.- Rodillo de sincronizado

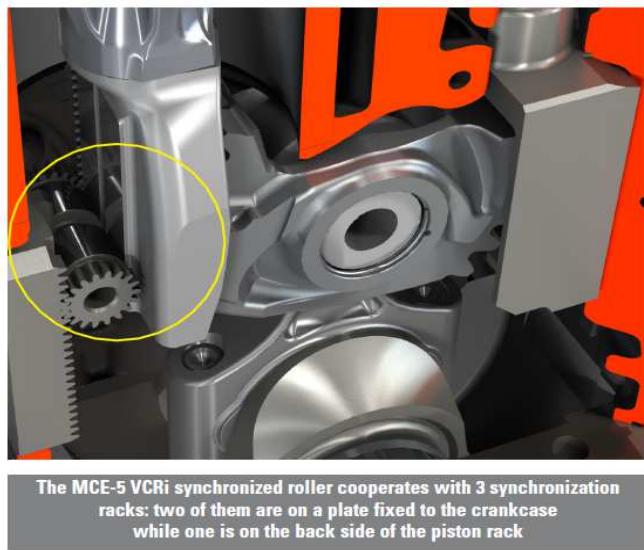


Imagen 108. Rodillo de sincronizado en el sistema VCR

El rodillo de sincronizado del sistema VCR, se encarga de guiar la parte inferior del conjunto cremallera-pistón, manteniéndose siempre al mismo nivel que el engranaje, de modo que se reduzca la tensión radial que se aplica en la base del pistón. Este nivel varía cuando varía la relación de compresión, llegando a compensarse con respecto al engranaje, subiendo 3.15 mm cuando se alcanza la mínima relación de compresión.

El rodillo de sincronizado al mismo tiempo, sirve como soporte de la biela, para generar par en el cigüeñal por reacción con el cárter, ello significa que la biela no ejerce fuerza sobre el recorrido del pistón en el cilindro, sino que sus esfuerzos van transmitidos al rodillo de sincronizado y al dentado del engranaje, que influyen sobre la cremallera del pistón, y la cremallera del actuador. Esta configuración, es la responsable de la gran reducción de fricciones generada en el sistema VCR, las tensiones radiales generadas en el pistón, son reemplazadas por rodadura pura en el rodillo de sincronizado y las superficies dentadas.

Por tanto, únicamente la culata y el cárter reaccionan con el sistema, transmitiendo los esfuerzos al bloque motor.

El rodillo de sincronizado se mantiene en posición vertical por tres cremalleras de sincronización, una, la cremallera del pistón y las otras pertenecientes al bloque motor, las cremalleras pertenecientes al bloque motor, tienen poca influencia operacional y su función es la de garantizar la horizontalidad del rodillo, mientras que la cremallera de sincronización del pistón tiene mayor funcionalidad en el sentido de que se encarga de mantener el pistón de combustión vertical.



Imagen 109. Rodillo de sincronizado

El bajo módulo de diente del dentado del rodillo de sincronizado principalmente absorbe sus fuerzas de inercia. En este contexto, la función básica del reducido módulo es corregir la desviación producida por su deslizamiento. El rodillo es guiado axialmente por una hendidura en su centro, que coopera con una guía practicada en la superficie de la pared del cárter.

Dimensions	
Pitch circle diameter (mm)	18
Module	1
Number of teeth	18
Overall width (mm)	45
Teeth contact width piston side (mm)	5.4
Total rolling surface width (mm)	24.9
Crowning of the rolling track (µm)	15
Teeth geometrical quality class	Qualité 7 norme ISO 1328
Weight (g)	72
Operating conditions	
Max force applied to rolling surfaces (N)	33,000
Max Hertz pressure applied to rolling surfaces (MPa)	2,500
Production technical data	
Material	RA4W (80MoCrV42-16)
Production process	Turning, cutting, cylindrical grinding, electrochemical precision machining

**The main characteristics of the MCE-5 VCRi synchronized roller**

Tabla 14. Características técnicas del rodillo de sincronizado

#### 4.2.4.2.7.- Pistón de combustión



Imagen 110. Pistón de combustión sistema VCR

Este pistón es muy diferente de los pistones convencionales. Para empezar, está sometido a tensiones radiales 5 veces inferiores a las que se ve sometido un pistón estandar, y esta tensión, es una media de entre 20 y 100 veces por debajo en bajas cargas. Está orientado por el perfil específico que actúa sobre el rodillo de sincronizado. El pistón se desplaza por la cremallera, en vez de rotar en torno a un punto como estamos acostumbrados en los motores de combustión.

Esto permite un sencillo posicionamiento angular durante el montaje. Esta unión es muy robusta y permite una durabilidad elevada de operación en el pistón sin que exista ningún riesgo de desmontaje.



Imagen 111. Despiece del pistón de combustión junto con la cremallera

Cómo oposición a los pistones convencionales, el pistón del sistema VCR no está sujeto a inclinaciones. Las inclinaciones pueden influir en la correcta operatividad de la lubricación y dañar el cilindro. Por otro lado incrementan el ruido.

El pistón tiene un forma circular y tiene practicadas aletas que contribuyen a su enfriamiento. Su forma regular limita las distorsiones locales y su impacto en la operatividad. Las aletas están colocadas debajo de la corona del pistón, permitiendo una refrigeración natural que se ve incrementada con la refrigeración continua de aceite con unas determinadas características térmicas.



Imagen 112. Estado térmico del pistón en funcionamiento

El pistón está fabricado con aluminio al silicio.

Dimensions	
Diameter (mm)	75
Skirt height (mm)	12
Overall height (mm)	69.53
Stroke (mm)	84
Weight (g)	280
Operating conditions	
Maximum radial stress (N)	1,360
Average radial stress (N)	425
Maximum gases expansion force (N)	53,000
Maximum acceleration (g)	2,400
Tightening stress (N)	16,000
Production technical data	
Material	<i>Confidential</i>
Anti-friction coating	Graphal
Piston/rack linkage	Stud bolt plastic domain

**The main characteristics of the MCE-5 VCRi piston**

Tabla 15. Características técnicas del pistón de combustión

En este esquema se muestran las mejoras sustanciales que remarcan la singularidad del diseño de este pistón de combustión:

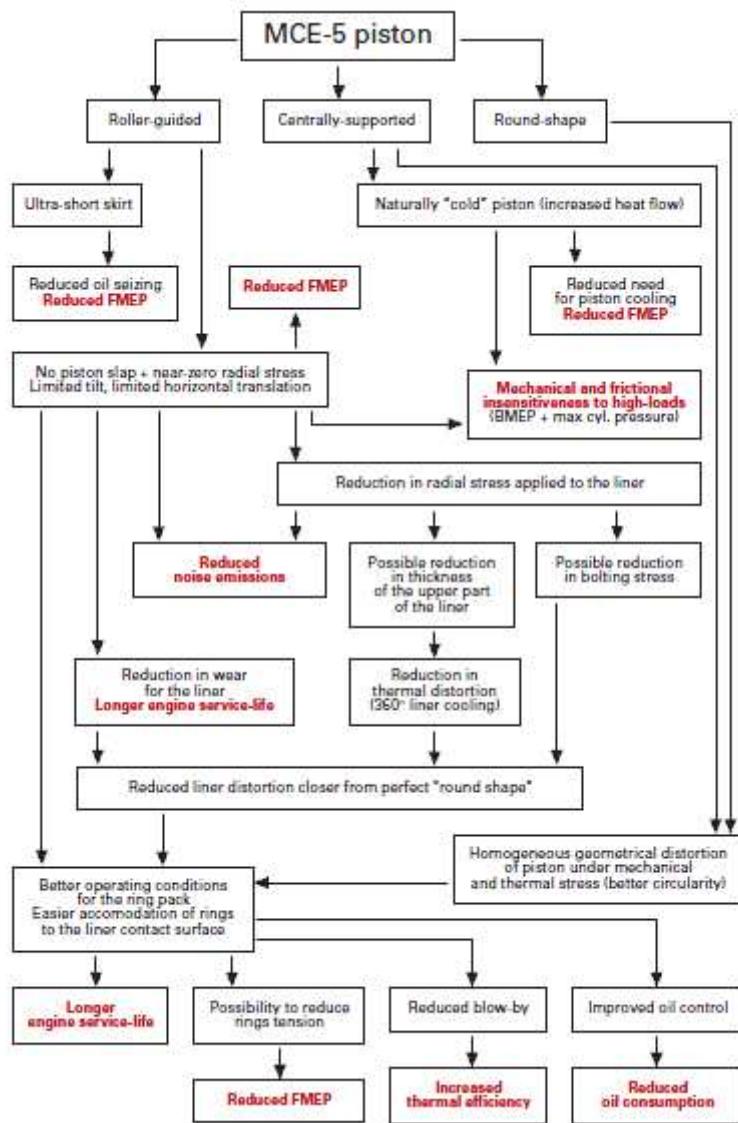


Imagen 113. Esquema de ventajas del diseño del pistón de combustión del sistema VCR

#### 4.2.4.2.8.- Cilindro actuador

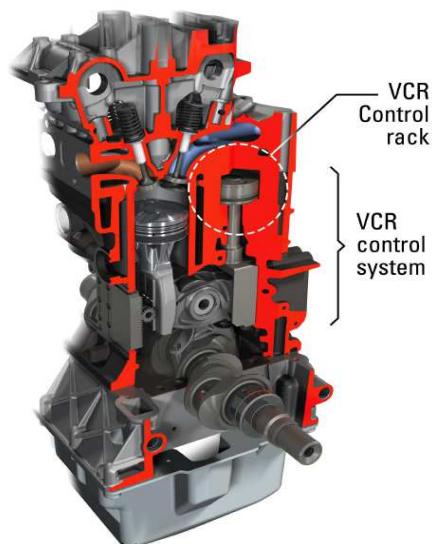


Imagen 114. Esquema del cilindro actuador

El actuador del sistema VCR se apoya para su funcionamiento en una plataforma hidráulica y en control electromecánico. La plataforma hidráulica actúa sobre un seguidor que es desplazado por la presión de gas y la inercia del motor, haciendo del uso de la bomba hidráulica algo innecesario.

Esto hace disminuir el consumo de energía.

El sistema comprime dos bolas, cada una con una doble función: actúan con una simple válvula cuando se desplazan en un sentido, y por otro lado sirven como válvula de cierre o seguridad cuando la presión hace que desplazan hacia el contrario. El uso de las bolas es debido a su elevada robustez, ligado al excelente sellado que permiten cubriendo una elevada sección.

Cuando se requiere un aumento en la relación de compresión, la bola de la cámara inferior del actuador se mantiene abierta durante el tiempo que se necesite para alcanzar ese ratio de compresión.

Un sensor indica la posición de la cremallera de control con una precisión de más-menos 0.02 mm; cuando el nivel de compresión se ha alcanzado la bola retorna inmediatamente a su posición inicial.

En caso contrario, si lo que se busca es disminuir la relación de compresión, la operación es exactamente al revés, el sensor también ha sido desarrollado para indicar la posición del pistón de combustión en el punto TDC (Top Dead Center).

Dependiendo del ángulo del cigüeñal en el cuál el fragmento de pistón es detectado, es posible de forma certera, determinar si se encuentra en el punto TDC.

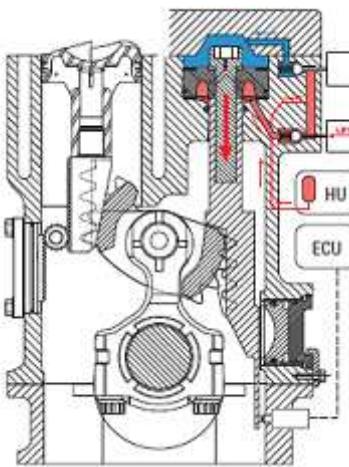
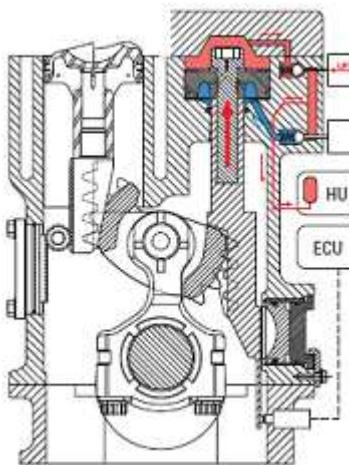


Imagen 115. Regulación de la relación de compresión

Se están realizando estudios con válvulas accionadas electromagnéticamente o mediante bolas que se deslizan por la acción hidroelectromagnética (usando un circuito de presurización hidráulica para desplazar las bolas).

Al tratarse este motor de compresión variable de un prototipo, se busca el mayor compromiso entre coste, eficiencia y robustez y siguen estudiándose, como ya se ha comentado al inicio del análisis del motor, alternativas factibles perfeccionen y optimizan la idea.

Durante el montaje, el motor es ajustado de modo que el pistón de combustión nunca pueda chocar con la culata, incluso cuando la máxima relación de compresión es alcanzada.

El actuador usa el mismo aceite que es usado para lubricar el resto del motor. El aceite es presurizado entre 40 y 60 bar.

El actuador tiene dos cierres herméticos, uno en el pistón y otro en la cremallera de la biela. Están compuestos por un anillo Teflon externo y de un anillo interno de Viton® [81]. El sellado de la biela es particularmente tolerante debido a que la cremallera debe moverse libremente con respecto al actuador del pistón. Puede rotar en 3 ejes, lo que es vital para la distribución por contacto de la presión, entre la cremallera y los dientes del engranaje.

Las tensiones generadas por el actuador son transmitidas al bloque motor. Para reducir las presiones de Hertz en el punto de contacto entre el pistón y su guía la forma del pistón tiene forma de barril con un radio aproximado de 500 mm.

El actuador está controlado por el EMS (Sistema de Gestión del Motor), a través de la unidad central de control del motor y unas unidades específicas de control. En la versión futura del motor se espera poder controlar cada cilindro de forma individual, mediante buses entre el EMS y los controladores locales.

Dimensions	
Diameter (mm)	63
Overall piston height (mm)	24.9
Stroke (mm)	10.8
Weight (g)	331
Operational conditions	
Maximum axial stress (N)	53,000
Production technical data	
Material	32CDV13

**The main characteristics of the MCE-5 VCRi VCR actuator**

Tabla 16. Características técnicas del cilindro actuador

#### **4.2.4.2.9.- Empujadores hidráulicos**

Los empujadores hidráulicos mantienen las partes móviles en contacto con las otras. Estos empujadores hacen posible adpartar las holguras dimensionales, las deformidades generadas por acciones térmicas y la distorsión bajo carga en determinadas zonas. Por otro lado permiten el control de ruidos.

Cuando las fuerzas transmitidas son máximas por ejemplo, entre la cremallera y el engranaje, los empujadores aumentan la distancia sustancialmente de modo que el riesgo de interferencia se elimina.

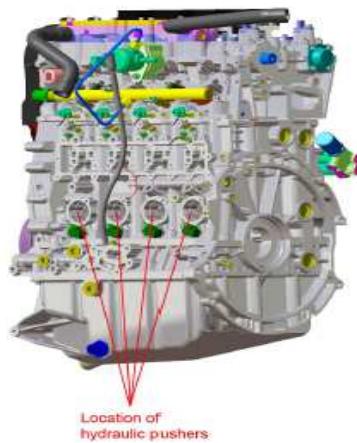


Imagen 116. Localización de los empujadores hidráulicos

La presión de operación es entre 40 a 60 bar dependiendo de la temperatura del motor. Esta presión es suministrada por el acumulador de presión del motor, que es el encargado de la distribución del aceite de lubricación por los componentes. Esta acumulador permite variaciones mínimas de presión en todas las posibles posiciones en las que se encuentre el empujador, garantizando la distribución de una presión constante.

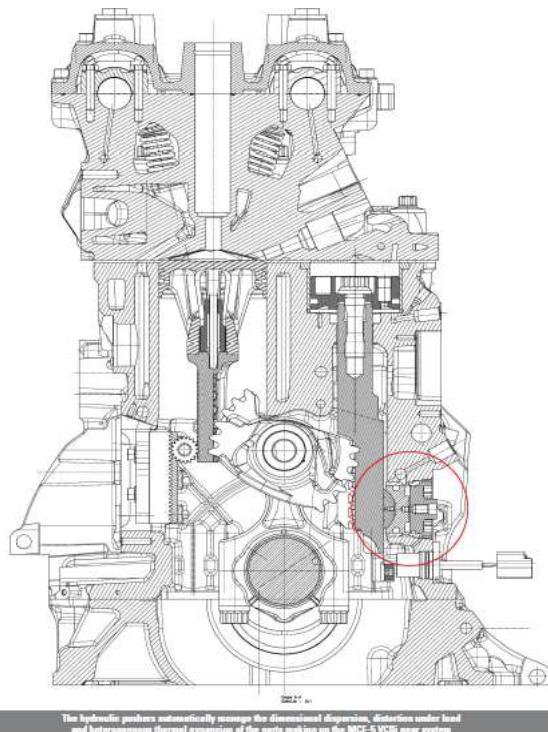


Imagen 117. Empujador hidráulico en el corte del bloque motor

Dimensions	
Piston diameter (mm)	36
Max piston stroke (mm)	0.4
Spherical bearing diameter (mm)	29.72
Clearance adjustment	Screwed and stopped adjusting cap
Weight of piston + spherical bearing + liner = Total (g)	63 + 29 + 52 = 144
Adjusting cap weight (g)	132
Operating conditions	
Oil pressure range (bar)	From 15 to 60
Force exerted on the control rack by pushers (N)	From 1,527 to 6,107
Production technical data	
Piston material	10NC6 carburized
Spherical bearing material	CuNi2Si (DELRIN surface treatment)
Liner material	Preprocessed steel 1100 N/mm <sup>2</sup> - hard chromium plated (60 µm before grinding)
Adjusting cap material	ZC016.06.01 (I.4418)
Production processes	Machining - grinding

*The main characteristics of the MCE-5 VCRi hydraulic pusher*

Tabla 17. Características técnicas del empujador hidráulico

#### **4.2.4.3.-Ventajas tecnológicas**

##### **4.2.4.3.1.- Reducción de emisiones**

Los principales objetivos del MCE-5 VCRi [81] se basan en las corrientes del *downsizing* y del *downspeeding*, estrategias que generan una ventaja constante.

De modo que la base del motor MCE-5 es ofrecer una reducción notable de emisiones de CO<sub>2</sub> por km, con bajos niveles de CO<sub>2</sub> durante su proceso de fabricación y su ciclo de reciclaje, aspectos, que en la vida de un producto, contribuyen en gran medida a la generación de dióxido de carbono.

El coste moderado del motor, genera que sea un producto enfocado a su producción en masa, buscando como objetivo principal, la reducción en la media de consumo de los coches nuevos.

El post-tratamiento está basado en un convertidor catalítico de 3 vías (que en el apartado del post-tratamiento de gases de este estudio analizaremos) de modo que se convierte en un sistema económico y a la vez eficiente.

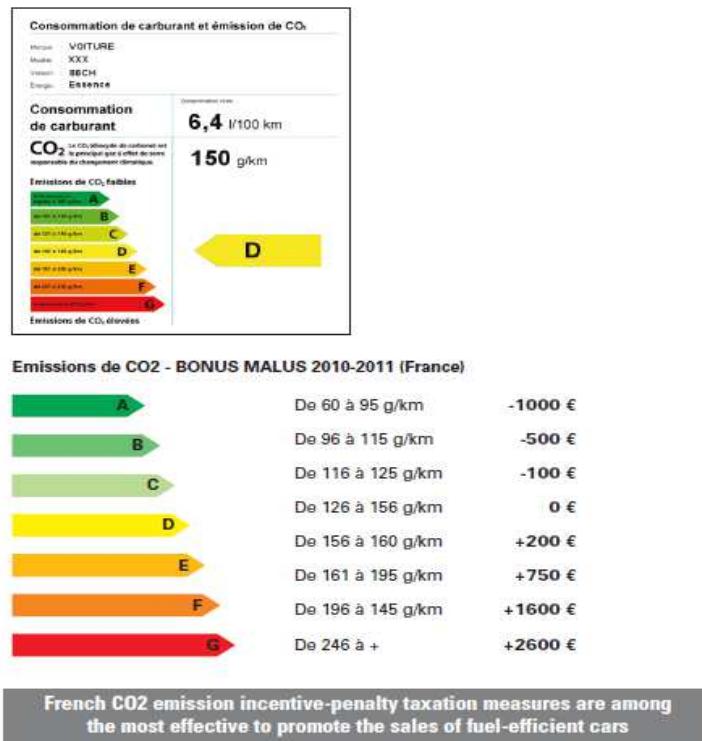


Imagen 118. Tasas impuestas al motor con sistema VCR por emisiones de CO<sub>2</sub> en Francia

Realmente, el CO<sub>2</sub> no es un contaminante, es un gas no tóxico que genera efecto invernadero, y es emitido en función del combustible consumido.

Por otro lado, como ya sabemos, se generan otros productos de desecho, como HC, NOx y partículas con agentes contaminantes tóxicos. Estos productos no son proporcionales a la cantidad de combustible consumido, dependen de la calidad de la combustión, de la homogeneidad de la mezcla, de la propagación de la llama, de la temperatura de combustión máxima, etc. por tanto las regulaciones aplicadas a emisiones de CO<sub>2</sub> difieren de las de los demás componentes.

**Diesel vehicles:**

Norm	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> )	-	-	500	250	180	80
Carbon Monoxide (CO)	2720	1000	640	500	500	500
Hydrocarbons (HC)	-	-	-	-	-	-
HC + NO <sub>x</sub>	970	900	560	300	230	170
Particulate Matter (PM)	140	100	50	25	5	5

**Vehicles using gasoline, LPG or CNG:**

Norm	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> )	-	-	150	80	60	60
Carbon Monoxide (CO)	2720	2200	2200	1000	1000	1000
Hydrocarbons (HC)	-	-	200	100	100	100
Particulate Matter (PM)	-	-	-	-	5(*)	5(*)
Non Methanic Hydrocarbons (NMHC)	-	-	-	-	68	68

(\*) Only for gasoline vehicles with a direct injection, operating lean burn (stratified charge)

**Marketing vehicles emitting pollutant levels  
above the limits set by regulations is forbidden**

Tabla 18. Normativas Euro de emisiones

Las penalizaciones económicas tienen como objetivo el disuadir a los fabricantes de automóviles de producir coches con altas emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras prohíben la venta de los coches que emiten agentes contaminantes por encima de un cierto nivel autorizado.

Hay una contradicción en esto para los vehículos; las emisiones contaminantes son generalmente inversamente proporcionales a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los coches de gasolina que emiten altos niveles de CO<sub>2</sub> por kilómetro emiten menos agentes contaminantes gracias a sus catalizadores de 3 vías, mientras que los coches Diésel que emiten bajos niveles de CO<sub>2</sub> generan altos niveles de óxido de nitrógeno y partículas. Esta observación puede ser hecha para motores independientemente del tipo; reducir las emisiones de un Diesel aumenta las emisiones contaminantes. Asimismo, existen diversas estrategias aplicables a motores de gasolina para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En este contexto, el motor de MCE-5 VCRI proporciona una amplia gama posibilidades; opera con una mezcla de aire/combustible con proporciones constantes, haciéndolo compatible con un catalizador simple de 3 vias, que es una solución eficaz, de post-tratamiento de bajo coste.



Particulate filters and selective catalytic reduction:  
future Diesel engine after-treatment systems will be too costly  
for bottom-of-the-range vehicles

Imagen 119. Filtro de partículas con adición de AdBlue y reducción catalítica

El MCE-5 VCRi no requiere de filtro de partículas o SCR, que son sistemas costosos. Hasta este punto, MCE-5 VCRi no deja de ofrecer ventajas ya implementadas en la mayoría de motores de gasolina. Sin embargo, MCE-5 VCRi con su relación de compresión variable le permite optimizar la eficiencia energética y la cantidad de contaminantes que produce, dependiendo de si su convertidor catalítico de 3 vías está listo para funcionar o no (una temperatura de aproximadamente 240 ° C es necesaria para poner el catalizador operacional). Durante el arranque en frío, el MCE-5 produce niveles muy bajos de polución, mientras su convertidor catalítico está frío, pero produce mucho calor en los gases de escape para acelerar su calentamiento. Esta estrategia además reduce la cantidad de combustible. Cuando ya se ha calentado produce gases de polución, que es inevitable si se busca reducir la media de producción de combustible. Pero estos gases son transformados en gases no contaminantes antes de ser lanzados a la atmósfera.

Estas diferentes estrategias, hechas posibles por la tecnología de MCE-5 son vitales para maximizar la rentabilidad y aprovechamiento de coches a largo plazo, a pesar de las cada vez más estrictas normas.



The MCE-5 VCRi is fully compatible with the 3-way catalyst,  
which is a popular, affordable and efficient after-treatment system

Imagen 120. Catalizador de 3 vías

#### **4.2.4.3.2.- Reducción en el consumo**

La reducción en el consumo de combustible sin tener en cuenta las prestaciones no tiene ningún sentido: las prestaciones es uno de los factores principales que determinan el consumo de combustible.

El peso, dimensiones totales y rasgos físicos del automóvil, la mayor capacidad de aceleración y la velocidad máxima de un vehículo, generan un mayor consumo de combustible durante la conducción.

Los vehículos más económicos son pequeños y ligeros con niveles de prestaciones pobres. Al contrario, vehículos grandes, deportivos de tracción 4x4 aúnan todos los factores que conducen al alto consumo de combustible.

Durante la conducción normal, como ya se sabe, la mayor parte de la energía liberada por el motor en la combustión es perdida en forma de calor (aproximadamente el 80%). Esta baja eficiencia es una de las primeras limitaciones sobre las cuales podemos actuar: aumentando la eficiencia del motor un 10%, disminuimos el consumo en la misma proporción; llegando a aumentos del 20% - 30 % conseguimos reducir hasta un 33%. La problemática es que los sistemas son muy caros, para ser implementados en vehículos estándar.

<b>ACTION</b> 10% reduction in	<b>RESULT</b> % in fuel consumption reduction and in CO2 emission reduction
Vehicle weight	3.5 - 5%
Air drag coefficient	1.5 - 2%
Frontal area	1.5 - 2%
Rolling resistance	2%
Transmission losses	6%
Engines specific fuel consumption	10%

*Source : IFP*

**Increased engine efficiency  
is the most determining factor in fuel consumption reduction**

Tabla 19. Influencia de la reducción de determinados parámetros y los resultado en consumo y reducción de emisiones de CO2

Las tecnologías desarrolladas deben ser tan eficientes como viables desde un punto de vista energético y por otro lado, tener un precio de coste, lo más bajo posible. El objetivo es alcanzar el nivel más bajo de coste/beneficio posible. Esta proporción es expresada en euros por gramo de CO2 eliminado.



Imagen 121. Comparativa de emisiones en función del tamaño del tipo de vehículo

En este contexto, la tecnología MCE-5 VCRi ofrece un nivel bajo entre coste/beneficio en proporción a la eficiencia energética que genera. Esto mantiene las prestaciones en sus niveles más altos y tiene un impacto bajo sobre el precio de las ventas del vehículo. Estas cualidades son vitales para asegurar la futura rentabilidad en la industria automotriz.

Price of SP 95 - France March 2010: 1.35€/L	Basic FCR GDI turbo	Basic VCR MPFI with an internal piston compressor or 2-stage turbo		Money savings for end customer over 200,000km (€)
		Reduction in CO2 (g/km – NEDC)	Production add-on cost (€)	
Small cars 65kW	Reference:	-8	+120	660
		-12	+120	1110
		-16	+150	1500
		-21	+210	1943

*Production add-on cost is multiplied by 2 for determining the end customer purchase price*

**Even a basic MCE-5 VCRi MPFI engine remains profitable for end customers**

Tabla 20. Ahorro con implementación del sistema VCR

## **4.2.5.- Post-tratamiento de los gases de escape**

### **4.2.5.1.- Las emisiones en motores alternativos de combustión interna**

La energía mecánica, indispensable para poner en acción diferentes máquinas se puede obtener utilizando energía térmica, hidráulica, solar y eólica. La que más se utiliza es la energía térmica obtenida de los combustibles de naturaleza orgánica. Los equipos energéticos que más aceptación han tenido son los motores de combustión interna, a ellos corresponde más de un 80 % de la totalidad de la energía producida en el mundo.

En la Unión Europea aunque los medios de locomoción son responsables únicamente de un 5 % de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), son responsables del 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), del 87 % de las de monóxido de carbono (CO) y del 66 % de las de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

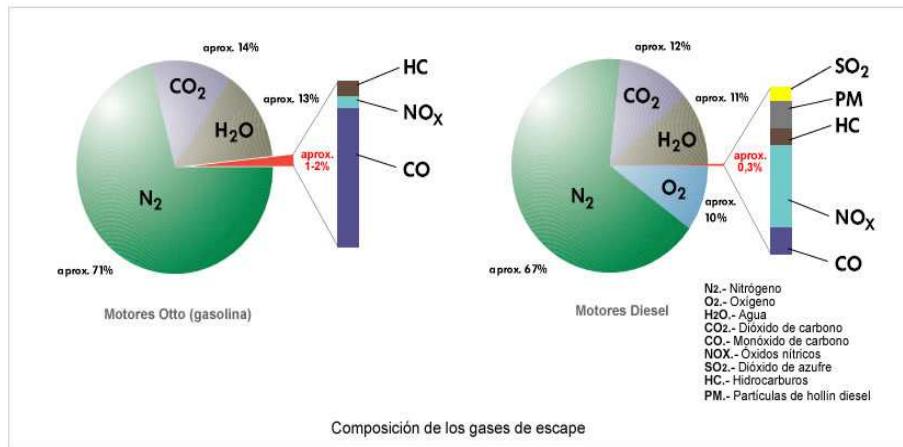
Por todas estas razones se está intentado por todos los medios posibles la reducción de los gases de escape y sus emisiones contaminantes.

#### **4.2.5.1.1.- Componentes de los gases de escape**

El aire está compuesto básicamente por dos gases: nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). En un volumen determinado de aire se encuentra una proporción de nitrógeno (N<sub>2</sub>) del 79 % mientras que el contenido de oxígeno es aproximadamente de un 21 %.

El nitrógeno durante la combustión, en principio, no se combina con nada y tal como entra en el cilindro es expulsado al exterior sin modificación alguna, excepto en pequeñas cantidades, para formar óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). El oxígeno es el elemento indispensable para producir la combustión de la mezcla.

Cuando se habla de la composición de los gases de escape de un vehículo se utilizan siempre los mismos términos: monóxido de carbono, óxido nítrico, partículas de hollín o hidrocarburos. Decir que estas sustancias representan una fracción muy pequeña del total de los gases de escape. Debido a ello, antes de describir las diferentes sustancias que integran los gases de escape, le mostramos a continuación la composición aproximada de los gases que despiden los motores Diesel y de gasolina.



Gráfica 10. Composición de los gases de escape

El motor de combustión interna, por su forma de funcionar, no es capaz de quemar de forma total el combustible en los cilindros. Pero si esta combustión incompleta no es regulada, mayor será la cantidad de sustancias nocivas expulsadas en los gases de escape hacia la atmósfera. Dentro de los gases generados en la combustión, hay unos que son nocivos para la salud y otros no.

## NO<sub>x</sub>

La emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera produce una gran variedad de problemas en la salud de la población como así también efectos ambientales negativos sobre el planeta. La exposición directa a tales óxidos en concentraciones atmosféricas superiores a 3 ppm aumenta las posibilidades de enfermedades pulmonares en niños y agrava los problemas de enfermos cardíacos.

Además de su toxicidad, reacciona con los hidrocarburos sin quemar para formar ozono, causante principal del smog fotoquímico, el que origina entre otros problemas de salud, irritación de la vista, tos, dolores de cabeza y problemas respiratorios.

Además causa daño en la forestación y afecta seriamente al crecimiento de ciertas variedades de cultivos y frutales; junto con los óxidos de azufre son los principales responsables de la lluvia ácida.

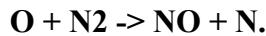
Anualmente más de 30 millones de toneladas de NO<sub>x</sub> son expulsados a la atmósfera, siendo generados principalmente en los procesos de combustión en fuentes móviles (automóviles, camiones, transporte público) y fuentes fijas (centrales de potencia, hornos incineradores). Hay también una contribución de otras industrias químicas (producción de ácido nítrico, urea, etc.).

Los óxidos de nitrógeno son formados en los procesos de combustión por dos vías: la oxidación del nitrógeno del aire a alta temperatura o por la oxidación de compuestos de nitrógeno contenido en los combustibles.

Actualmente el contenido de compuestos nitrogenados en los gasóleos que se emplean para la venta en automoción es tan pequeño que se considera como hipótesis correcta partir de que el único mecanismo de formación de NOx es de origen térmico y no por la oxidación del combustible.

Según parece, nace en llamas muy calientes (a temperaturas por encima de 2000 grados Kelvin), siendo el único de los óxidos de nitrógeno formado directamente en las llamas, ya que el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) aparece más tarde, mediante reacciones lentas con el oxígeno atmosférico que tienen lugar incluso a temperatura ambiente.

En llamas muy calientes, el nitrógeno molecular del aire pierde su carácter de inerte y se divide mediante oxígeno, en la reacción:



Llegados a este punto los átomos de nitrógeno tienen dos opciones, o atacan al oxígeno molecular formando óxido nítrico y oxígeno atómico,



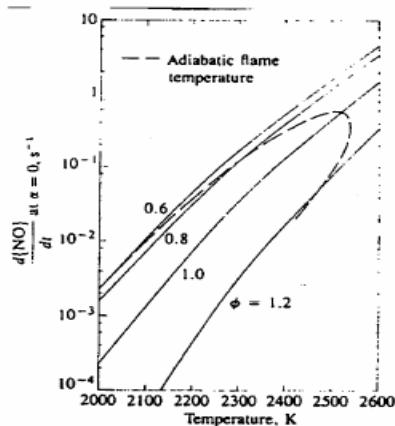
o por el contrario interaccionan con un hidróxido para formar óxido nítrico con hidrógeno atómico, completándose así la cadena de tres reacciones conocidas como mecanismo de Zeldovich.

- $\mathbf{O} + \mathbf{N}_2 \rightarrow \mathbf{NO} + \mathbf{N}$
- $\mathbf{N} + \mathbf{O}_2 \rightarrow \mathbf{NO} + \mathbf{O}$
- $\mathbf{N} + \mathbf{OH} \rightarrow \mathbf{NO} + \mathbf{H}$

Hasta ahora se ha comentado la importancia que tiene en la formación de óxidos de nitrógeno la temperatura, pero es necesario considerar otros factores como:

- La presión
- Tiempo de exposición
- Disponibilidad de oxígeno

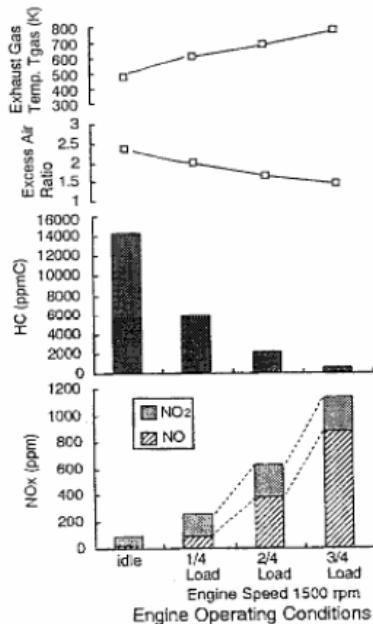
La gráfica siguiente no tiene como objetivo mostrar datos concretos sobre la formación de NOx, sino simplemente servir como herramienta para comprender la importancia que tiene la temperatura en la formación de óxidos de nitrógeno en los motores Diesel.



Gráfica 11. Velocidad de formación del NO en función de la temperatura pico y dosado

En la figura se aprecia como para mezclas cercanas a la estequiométrica de aire-combustible, se incrementa considerablemente la velocidad de formación de NOx, el principal motivo es que la temperatura que se alcanza en la llama para esas condiciones de trabajo es la más alta, factor que como se comentó con anterioridad es vital en la formación del NOx.

Por otro lado se aprecia como para una misma temperatura de llama la mezcla pobre tiene velocidades de formación muy superiores (en varios órdenes de magnitud) respecto a la mezcla más pobre.



Gráfica 12. Formación de NOx y HC en función de la cantidad de aire y la temperatura de entrada de aire de admisión

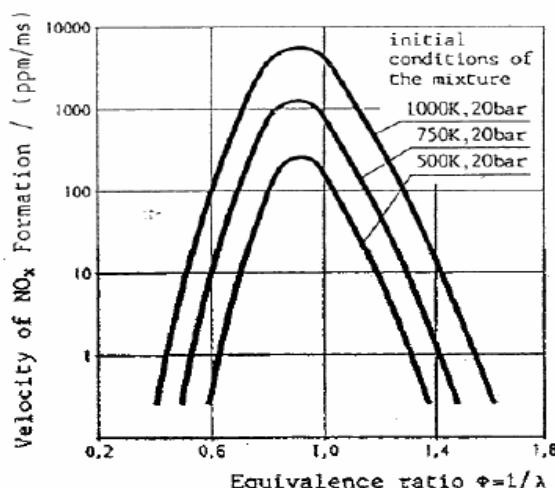
La Gráfica 13 muestra claramente lo comentado con anterioridad sobre la importancia de la temperatura alcanzada durante la combustión para la formación de NOx.

Si bien en este caso para cargas del 75 % en adelante, donde la formación de NOx es máxima, las emisiones quedan relegadas en un segundo plano en pos de las prestaciones, como se detallará en el apartado del ciclo de emisiones.

Por otro lado la figura anterior, sirve de adelanto para observar la problemática que entraña la optimización de emisiones contaminantes en motores Diesel, dado que cuando un parámetro sube, en este caso el NOx, otro baja (las emisiones de hidrocarburos sin quemar)

En conclusión cualquier factor que haga reducir la temperatura pico será muy útil en la lucha contra la formación de NOx en el interior de la cámara de combustión.

Uno de los parámetros que condicionan más fuertemente las emisiones, es el dosado o la relación entre el aire y el combustible.



Gráfica 13. Velocidad de formación del NOx en función de la temperatura de entrada y dosado

Cómo ya se comentó, para lambdas excesivamente altos (mezclas pobres) las temperaturas que se alcanzan en la cámara son bajas debido a que con el exceso de aire, el combustible tiene problemas para quemarse y propagar la llama, sucediendo un fenómeno similar para mezclas excesivamente ricas en las que la falta de oxígeno provoca la no proliferación de la llama, bajando considerablemente la temperatura de pico alcanzada en la cámara de combustión y por tanto la velocidad de formación del NOx.

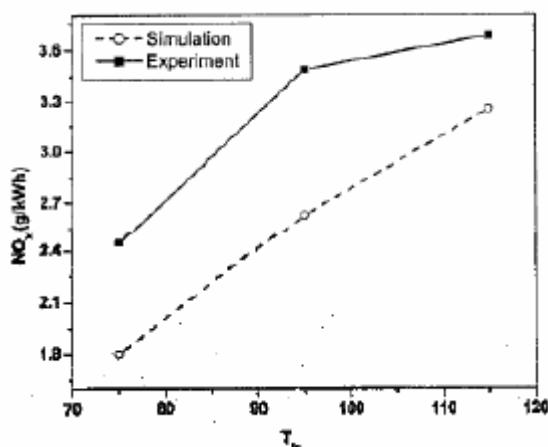
Por otro lado analizando la zona cercana a la mezcla estequiométrica se ve que una mezcla ligeramente empobrecida, es decir, con exceso de aire es más proclive a generar NOx, esto es debido a que en estas condiciones la existencia de algo de oxígeno sobrante que pueda oxidar el nitrógeno favorece la reacción.

En el caso de los motores Diesel la base de trabajo es siempre mezcla pobre (lambda mayores que uno) y más aún si se consideran motores sobrealimentados, en los que para la misma potencia se empobrece todavía más la mezcla.

Factores como la combustión de premezcla afectan negativamente a la formación de NOx. En un ciclo Diesel durante la combustión de premezcla se produce una liberación súbita de energía que no es controlable y que además tampoco tiene opción a ser aprovechada.

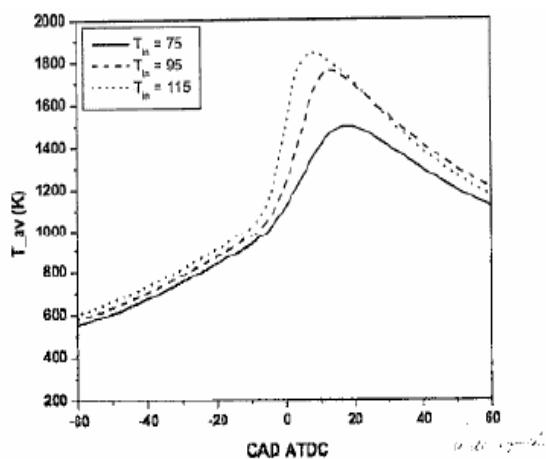
El producto principal de dicha liberación súbita de calor, lleva consigo un aumento de los gradientes de presión y de la temperatura pico que se alcanza en la cámara, de forma que la introducción de la inyección piloto se hace primordial para controlar la formación de NOx.

La temperatura de entrada del aire a la cámara de combustión es otro factor dominante a la hora de evaluar las emisiones de NOx, ya que éstas son directamente proporcionales a la temperatura de entrada. Como se muestra en la Gráfica 14.



Gráfica 14. Emisión de NOx en función de la temperatura de entrada al motor

La figura siguiente representa la temperatura que se alcanza en la cámara durante el proceso de combustión para tres casos concretos en los que se varía la temperatura de entrada del comburente, apreciándose claramente su importancia, dado que para una temperatura de 75°C, el pico máximo que se alcanza no llega a los 1500 K, de forma que la formación de NOx se produce a un ritmo muy lento, mientras que para una temperatura de entrada de 115°C, prácticamente se alcanza el no deseable umbral de los 2000 K, donde las velocidades de formación son muy altas.



Gráfica 15. Evolución de la temperatura pico de combustión función de los grados de cigüeñal

Una combustión gradual y progresiva es fundamental para lograr reducir las temperaturas pico dentro de la cámara de combustión, para ello la importancia de la ya comentada pre- inyección que reduce la combustión de premezcla, pero una vez ésta ya se ha producido, el siguiente factor que determina la temperatura pico que se va a alcanzar en la cámara es el momento en el que se introduce la inyección principal.

Adelantar la combustión (siempre que no se haga en exceso) aumenta considerablemente la temperatura pico en la cámara de forma que retrasar el avance de inyección lleva consigo un retraso en la combustión favoreciendo la no formación de óxidos de nitrógeno.

#### **4.2.5.1.1.1.- Partículas sólidas**

##### **Partículas diesel (DPM)**

Definido por las regulaciones EPA, es un agregado complejo de material sólido y líquido. Su origen son las partículas de carbono generadas en el cilindro durante la combustión.

Las partículas primarias de carbono forman largos conglomerados combinándose con otros componentes principales de los gases de escape diesel, tanto orgánicas como inorgánicas.

De forma General, las DPM son clasificadas en tres grupos.

- Sólidos: Partículas de carbón seco, comúnmente conocidas como carbonilla.
- SOF: Hidrocarburos pesados absorbidos y condensados en las partículas de carbón, llamados Moléculas de Soluciones Organicas.
- SO<sub>4</sub>: Molécula de sulfato, ión del ácido sulfúrico hidratado.

La composición del DPM dependerá particularmente del motor así como de sus condiciones de velocidad y carga.

Las "Partículas húmedas" pueden componer sobre un 60% de moléculas de hidrocarburos (SOF), mientras que las "partículas secas" pueden contener la mayoría del carbón seco.

La suma de sulfatos es directamente proporcional al contenido de azufre en el gas-oil, de forma que eliminándolo del combustible se evita la formación de dichas partículas.

Las partículas Diesel son muy finas. Los núcleos de las partículas primarias de carbón tienen un diámetro en milésimas de milímetro (micrón) de 0.01 a 0.08, mientras que el aglomerado de partículas tiene un diámetro comprendido entre 0.08 y 1 micrón.

Por esto, las partículas diesel son en casi su totalidad respirables y tienen un impacto importante en nuestra salud. Han sido clasificadas por varias agencias gubernamentales como "provocadoras de cáncer" o "posibles provocadoras de cáncer". Son también conocidas por aumentar el riesgo de infarto y de provocar enfermedades respiratorias.

## **Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (PAH)**

Son hidrocarburos que contienen dos o más anillos de benzeno. Algunos compuestos de esta clase son conocidos como cancerígenos. Los PAH en los gases de escape están divididos entre gas y fases de partículas.

El componente más peligroso de cuatro y cinco anillos está presente en la fracción orgánica del DPM (SOF).

Después de su emisión, las partículas experimentan reacciones químicas en el aire, por esto su composición y tamaño varían dependiendo de la proximidad a las fuentes, el clima y otros factores. Las partículas ambientales generalmente caen dentro de una distribución de tres modos:

- Ultrafino (< 0,1 micrones)
- Fino (entre 0,1 y 1 micrones)
- Grueso (>1 micrones)

La Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos y otras agencias alrededor del mundo regulan el nivel de partículas en el ambiente de un diámetro inferior a 10 micrones (PM10). Algunas agencias, incluyendo la EPA de Estados Unidos, también regulan las partículas inferiores a 2,5 micrones de diámetro (PM2.5).

Si a este factor se añade la capacidad de dispersión en el ambiente que tienen dichas partículas, pudiendo llegar en tan sólo dos segundos a factores de dispersión 1000 veces superiores al que tenían cuando fueron emitidas por el motor, es inevitable pensar que la forma de legislar este apartado de las emisiones de un motor Diesel (tener en cuenta que este problema no surge en los MEP) es insuficiente.

Un gran número de estudios epidemiológicos en la última década han reportado una relación entre la exposición a corto plazo a MP10 y MP2.5 y el aumento en la morbilidad y mortalidad, particularmente entre aquellas personas con enfermedades respiratorias y cardíacas. Recientemente, los científicos han comenzado asimismo a investigar los efectos de las partículas ultra finas. Aunque estas partículas contribuyen muy poco a la masa de MP10 y MP2.5, están presentes en gran cantidad.

Algunos científicos han propuesto que las partículas ultra finas pueden ser especialmente tóxicas: las partículas más pequeñas tienen un área total de superficie mayor que aquellas partículas más grandes de masa igual, tendrían más probabilidades de penetrar e interactuar con células más profundamente en el pulmón que las partículas más grandes, y se piensa que se mueven rápidamente a tejidos exteriores de las vías respiratorias.

Una revisión de los estudios que comparan los efectos de partículas de diferentes tamaños lleva a las siguientes conclusiones:

- a) Estudios epidemiológicos, usando múltiples mediciones de exposición y diferentes períodos, muestran una asociación entre la cantidad de material particulado ultra fino y la mortalidad, función respiratoria, o síntomas respiratorios, pero estos efectos también están asociados a otros contaminantes (sulfatos, MP2.5, MP10).
- b) Repetidos estudios de inspiración intra-traqueal indican que las partículas ultra finas inducen a respuestas inflamatorias más fuertes que aquellas partículas de otros tamaños.

Una revisión de los estudios que comparan los efectos de partículas de diferentes tamaños lleva a las siguientes conclusiones:

- a) Estudios epidemiológicos, usando múltiples mediciones de exposición y diferentes períodos, muestran una asociación entre la cantidad de material particulado ultra fino y la mortalidad, función respiratoria, o síntomas respiratorios, pero estos efectos también están asociados a otros contaminantes (sulfatos, MP2.5, MP10).
- b) Repetidos estudios de inspiración intra-traqueal indican que las partículas ultra finas inducen a respuestas inflamatorias más fuertes que aquellas partículas de otros tamaños.

### Resumen

Las Partículas participarían en:

- Origen de procesos inflamatorios
- Daño funcional en los pulmones
- Aumento en el riesgo de infarto cardíaco
- Efectos sistémicos en todo el organismo a través de la sangre
- Efectos cancerígenos
- Aumento de muertes súbitas

Y por eso las autoridades responsables tienen que tomar medidas para reducir las emisiones cancerígenas al nivel más bajo posible como se hace en otros países del mundo (Estados Unidos, Unión Europea, Suiza entre otros).

### **4.2.5.1.1.2.- Otros contaminantes**

#### **Monóxido de carbono (CO)**

En una combustión completa de hidrocarburos, los productos de la reacción son agua ( $H_2O$ ) y Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), sin embargo cuando la combustión no es completa se pueden formar otros productos como el monóxido de carbono.

El Monóxido de carbono no es más que el producto de la oxidación parcial de las cadenas de carbono que es realmente el combustible, por tanto por cada molécula quese forma de monóxido de carbono, se deja de formar una de  $CO_2$ .

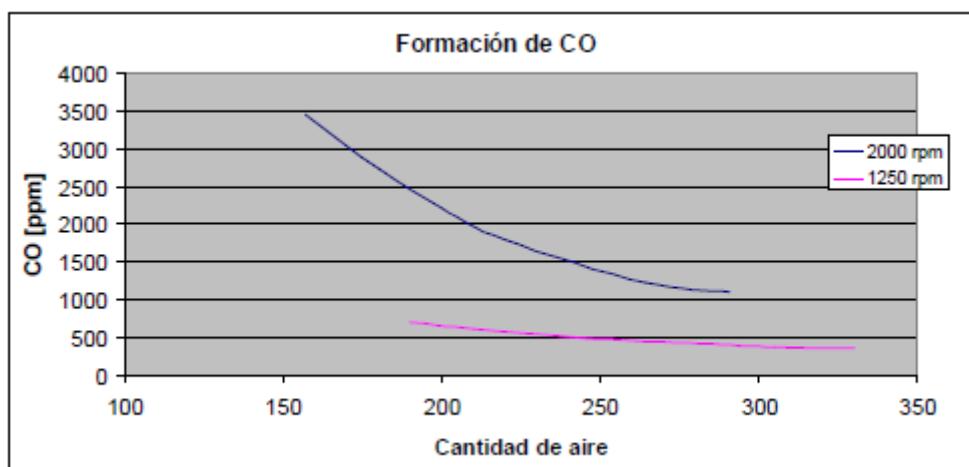
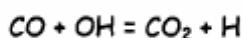
La concentración de CO en el escape de los motores MEP es significativamente más baja que la existente en muestras tomadas en la cámara de combustión durante el proceso de combustión, lo que muestra una posterior descomposición del CO inicialmente formado.

Asimismo, la concentración de CO en el escape es significativamente mayor que la correspondiente a las temperaturas en el escape, lo que indica que la cinética de la reacción juega un papel muy importante.

La química del CO es la siguiente:



A medida que mayor es la temperatura, la reacción se desplaza hacia la formación de CO. Por último, el CO se oxida, a un ritmo mas lento, transformándose en CO<sub>2</sub>.



Gráfica 16. Formación del CO

Sin embargo no conviene olvidar que el tiempo de exposición del carbón frente al oxígeno fresco, tiene una alta importancia.

La Gráfica 16 dejaba ver como para procesos de combustión a altas revoluciones, (tiempos de exposición bajos) la formación de carbono es mayor que para un punto homólogo de funcionamiento, pero a menores revoluciones donde el tiempo de combustión aumenta considerablemente.

El grado de apertura de la válvula EGR, que analizaremos más adelante es el tercer factor a tener en cuenta.

Para altas concentraciones de gases inertes en el cilindro, se produce un aumento espectacular (500%) de la formación de este tipo de contaminante. El motivo es claro, y es que al introducirse una fracción de los gases de escape nuevamente en la cámara de combustión estamos aumentando la cantidad de contaminantes por cada explosión.

Si a esto además se le añade que por cada unidad de volumen que ocupe el gas procedente del EGR, se deja de ocupar una unidad de volumen de aire fresco, el incremento de monóxido de carbono se convierte en una consecuencia evidente del EGR.

### **Consecuencias del CO para la salud**

Al ser inhalado el CO, éste se combina rápidamente con la hemoglobina de la sangre, contenida en los glóbulos rojos o eritrocitos, y reduce, a veces a niveles fatales, la capacidad de transporte de oxígeno de los pulmones a las células del organismo. La función normal de la hemoglobina es transportar el oxígeno de los pulmones a las células y recoger el CO<sub>2</sub> para evacuarlo por los pulmones.

Exposiciones, aún en muy bajas concentraciones, originan efectos adversos a la salud por el bloqueo permanente de la hemoglobina por el CO, pues ésta no puede liberar el gas mencionado.

Si se expone a una persona a una concentración de 100 ppm (= partes por millón) se produce dolor de cabeza, reducción del discernimiento mental y, después de dos horas de exposición, la capacidad de la sangre para acarrear oxígeno disminuye en un 90%. Aún en concentraciones de 15 ppm, comunes en áreas de alto tránsito de vehículos, sus efectos son notorios, especialmente en personas con afecciones nerviosas, cardiovasculares o pulmonares.

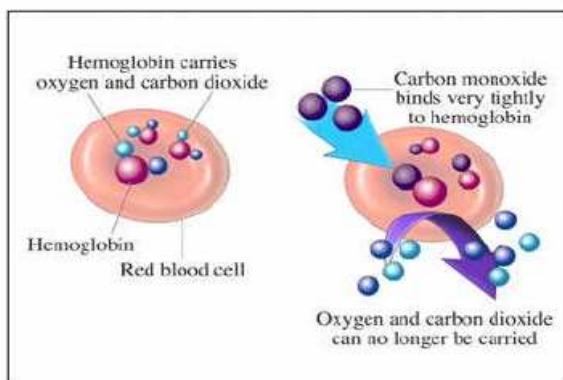


Imagen 122. Efecto del CO<sub>2</sub> en la sangre

#### **4.2.5.1.1.3.- Hidrocarburos in quemados**

El combustible empleado por los motores de encendido por compresión o tipo Diesel, es un hidrocarburo de cadena larga y por tanto pesado.

Las emisiones de hidrocarburos son consecuencia de la combustión incompleta de dicho combustible. Dado que hay una gran variedad de especies químicas, su concentración se suele expresar en ppm de átomos de carbono (C).

Se pueden dividir en dos grupos:

- HC metanos; no reaccionan con la atmósfera.
- HC no-metanos; sí reaccionan con la atmósfera.

La composición del combustible afecta sobremanera a las emisiones de HC.

Aquellos combustibles que tienen altos contenidos de olefinas y aromáticos generan más altas concentraciones de hidrocarburos reactivos.

Sin embargo muchas especies presentes en el escape no existen en el combustible que se quema, lo que indica que durante la combustión se desarrollan procesos de pirólisis y síntesis.

Los hidrocarburos oxigenados están presentes en el escape y es conocida su participación en la formación del smog.

Se suelen clasificar en:

- **carbonilos:** Los más importantes son los aldehídos y cetonas de bajo peso molecular. Los aldehídos volátiles irritan los ojos y las mucosas del sistema respiratorio. Los carbonilos constituyen el 10 % de las emisiones de HC de los Diesel y son despreciables en los MEP.
- **fenoles:** Son irritantes y poseen olor
- **no - carbonilos:** Metanol, etanol.

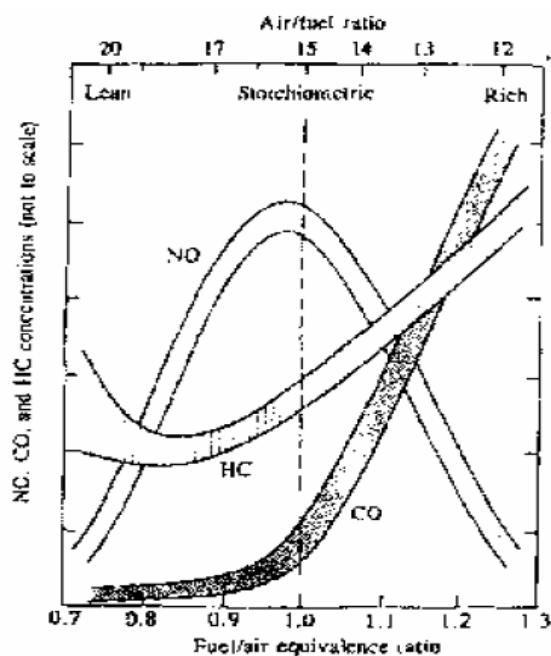
---

A la hora de formarse HC durante la combustión intervienen claramente 3 factores:

**1. El dosado:** Cuanto mayor sea el dosado (mezcla más rica) mayor será la formación de hidrocarburos inquemados. La explicación radica en que cuanto menor es la disponibilidad del oxígeno para el combustible, más opciones existen de que éste se quede sin quemar.

Sin embargo dosados excesivamente bajos también dispararía la formación de hidrocarburos, debido a que no habría el suficiente combustible como para propagar correctamente la llama y por tanto el combustible saldría del cilindro sin ser transformado.

De igual forma a lo que le sucede al monóxido de carbono y a las partículas, la utilización de la válvula EGR afecta negativamente a la formación de hidrocarburos inquemados, por los mismos motivos que se detallaron en el apartado del monóxido de carbono.



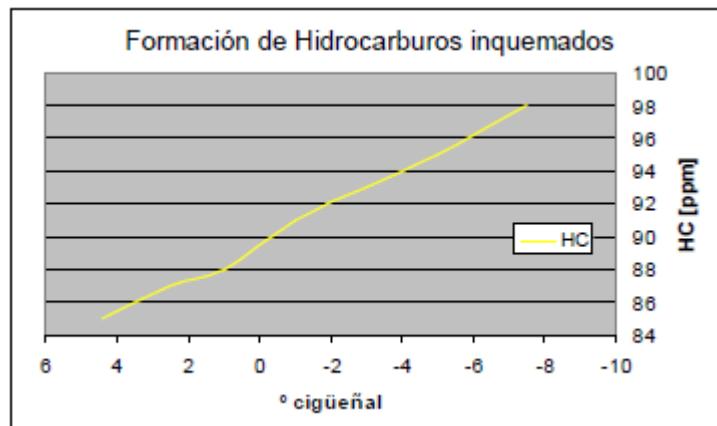
Gráfica 17. Contaminantes en función del dosado

La gráfica mostrada sobre estas líneas es extrapolable a lo que podría suceder en función del dosado, dado que representa la formación de contaminantes pero en los MEP.

**2. La Temperatura de la llama:** al contrario que al NOx, a la fracción de combustible sin quemar le afecta de manera inversa la temperatura. Dado que cuanto mayor sea la temperatura pico más opciones existen que el combustible se queme.

Es por ello que el avance de inyección se convierte en un parámetro muy importante para la formación de HC, dado que cuanto antes comience la combustión (avance de inyección grande), menores serán las temperaturas pico alcanzadas en la cámara.

La gráfica que se muestra a continuación representa la evolución en la formación de HC en función del avance de inyección. Nótese que avance de inyección positivo implica inyectar el combustible antes del punto muerto superior, y negativo implica inyección posterior.



Gráfica 18. Formación en función del angulo del cigüeñal

**3. La velocidad de inyección:** Por lo tanto el orificio del inyector y la presión a la que se inyecte el combustible es el otro factor determinante en la formación de HC.

## Consecuencias de los HC

Además de la intoxicación por hidrocarburos, al ser estos ingeridos en mezcla con el agua, el problema más habitual de éstos es la formación en muchas ciudades de lo que se denomina como smog fotoquímico.



Imagen 123. Efecto del smog fotoquímico en las grandes ciudades

Las reacciones fotoquímicas que originan este fenómeno se producen cuando la mezcla de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles reaccionan inducidos por la luz solar, en un complejo sistema de reacciones que forma ozono ( $O_3$ ) que es una molécula que sigue reaccionando con otros contaminantes presentes en el aire.

Esta reacción se ve favorecida en los casos de fuerte sol y poco viento, ya que dificultan la dispersión de los contaminantes, produciendo el oscurecimiento de la atmósfera dejando un aire teñido de color marrón rojizo cargado de componentes dañinos para los seres vivos y los materiales.

Aunque prácticamente en todas las ciudades del mundo hay problemas con este tipo de contaminación, es importante las que están en lugares con clima seco, cálido, soleado, con poco viento y tienen muchos vehículos.

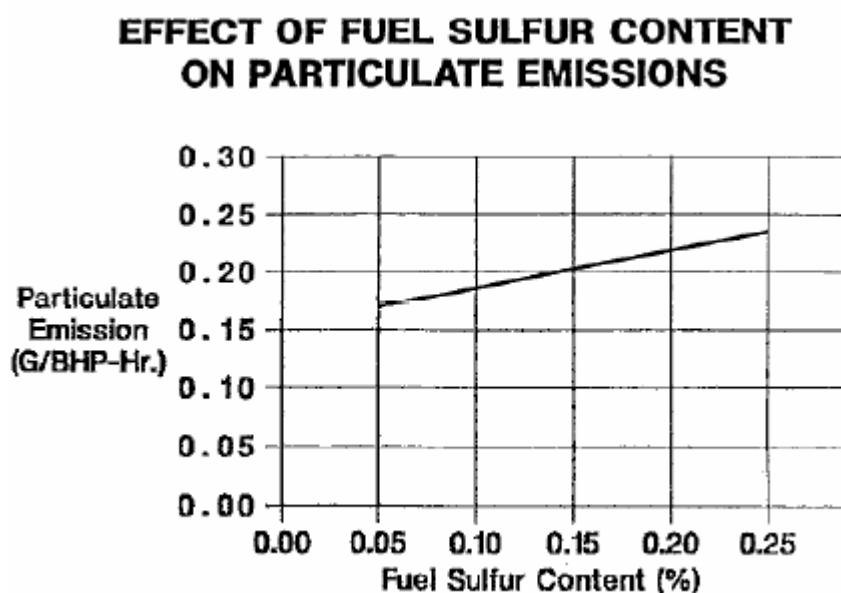
Sin embargo la composición tan variada de este tipo de contaminante hace que tenga otros efectos nocivos para la salud de los seres humanos. Dentro de los HC también podemos encontrar:

- Metano y derivados, que favorecen al conocido como efecto invernadero y al calentamiento del planeta.
- Aldehídos, este tipo de compuestos son los principales causantes de irritación y sequedad en los ojos.
- Benzeno, hidrocarburo cíclico conocido por sus efectos carcinógenos.

#### 4.2.5.1.1.4.-Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre son gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es el contaminante tomado como base que indica la concentración de óxidos de azufre en el aire.

La fuente primaria de óxidos de azufre es la que proviene directamente del gasóleo, de hecho, la cantidad del azufre que es emitido al aire (como dióxido de azufre) es casi la misma cantidad de azufre presente en el combustible.



Gráfica 19. Formación de óxidos de azufre en función del contenido de azufre del combustible

Por tanto la solución más obvia parece retirar todo el azufre posible de los combustibles, si bien esta medida no es para nada rentable.

Actualmente la mayoría de las petroleras presentan entre sus surtidores, la opción de comprar combustible desulfurado hasta solo 10 ppm, con el consiguiente incremento de precio de 4 a 5 centimos de €/litro, perdiéndose además ciertas propiedades lubricantes que el azufre otorgaba al gasoil, y que han de ser remplazadas por aditivos que realicen la misma tarea.

Sin embargo debido a la masiva implantación de los filtros de partículas, como tratamientos de gases de escape para reducir emisiones, la elección de este tipo de combustibles desulfurados se va a convertir en la única opción para no reducir la eficiencia de dichos filtros, que se colapsan al funcionar en presencia de las susodichas moléculas.

Se ha encontrado que los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio, especialmente de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. Los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o humedad del aire. Esto se conoce como efecto sinérgico porque la combinación de sustancias produce un efecto mayor que la suma individual del efecto de cada sustancia.

Los óxidos de azufre también son responsables de algunos efectos sobre el bienestar, el de mayor preocupación es la contribución de óxidos de azufre a la formación de lluvia ácida que puede perjudicar el ecosistema.

Masa de referencia (MR) (kg)		Valores límite de la norma Euro 6												
		Masa de monóxido de carbono (CO)		Masa total de hidrocarburos (HCT)		Masa de hidrocarburos no metanos (HCNM)		Masa de óxidos de nitrógeno (NOx)		Masa combinada total de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno totales (HCT + NOx)				
		L <sub>1</sub> (mg/km)		L <sub>2</sub> (mg/km)		L <sub>3</sub> (mg/km)		L <sub>4</sub> (mg/km)		L <sub>2</sub> + L <sub>4</sub> (mg/km)				
Categoría	Clase	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI <sup>(2)</sup>	CI			
M	—	Todos	1000	500	100	—	68	—	60	180	—	230	5,0	5,0
N <sub>1</sub>	I	MR ≤ 1305	1000	500	100	—	68	—	60	180	—	230	5,0	5,0
	II	1305 < MR ≤ 1760	1810	630	130	—	90	—	75	235	—	295	5,0	5,0
	III	1760 < MR	2270	740	160	—	108	—	82	280	—	350	5,0	5,0
N <sub>2</sub>			2270	740	160	—	108	—	82	280	—	350	5,0	5,0

Clave: PI = encendido por chispa, CI = encendido por compresión

(<sup>1</sup>) Se establecerá una norma relativa al número lo antes posible y, a más tardar, tras la entrada en vigor de Euro 6.

(<sup>2</sup>) Las normas sobre normas de masa de partículas de los vehículos de encendido por chispa se aplican únicamente a los vehículos con motores de inyección directa.

Tabla 21. Valores límite de Euro 6

#### **4.2.5.2.- Sistemas para reducir las emisiones contaminantes de los gases de escape**

Los perfeccionamientos obtenidos en la técnica de motores han llevado en los últimos años a mejores procesos de combustión y con ellos, a menores emisiones brutas. El desarrollo de sistemas electrónicos de control del motor ha hecho posible una inyección exacta de la cantidad de combustible necesaria y el ajuste preciso del punto de encendido, así como la optimización, en función del punto de funcionamiento de la activación de todos los componentes existentes. Estos dos puntos han llevado, además de un aumento de la potencia de los motores, también a una clara mejora de la calidad de los gases de escape.

No hay que desatender tampoco las mejoras de la calidad en los combustibles. De acuerdo con el aumento constante de la potencia de los motores, son mayores las exigencias formuladas al combustible. El empleo de aditivos disminuye los sedimentos e incrustaciones durante la combustión en el cilindro, reduce las sustancias nocivas contenidas en los gases de escape e impide incrustaciones perjudiciales en el sistema de combustible. El cambio a combustible sin plomo constituyó un hito en el camino hacia gases de escape más limpios de sustancias nocivas.

Con estas medidas se han podido reducir las emisiones desde los años 1970 en un 80% aproximadamente. Pero únicamente gracias al tratamiento posterior de los gases de escape con el catalizador, por ejemplo, fue posible alcanzar los valores límite exigidos por la legislatura.

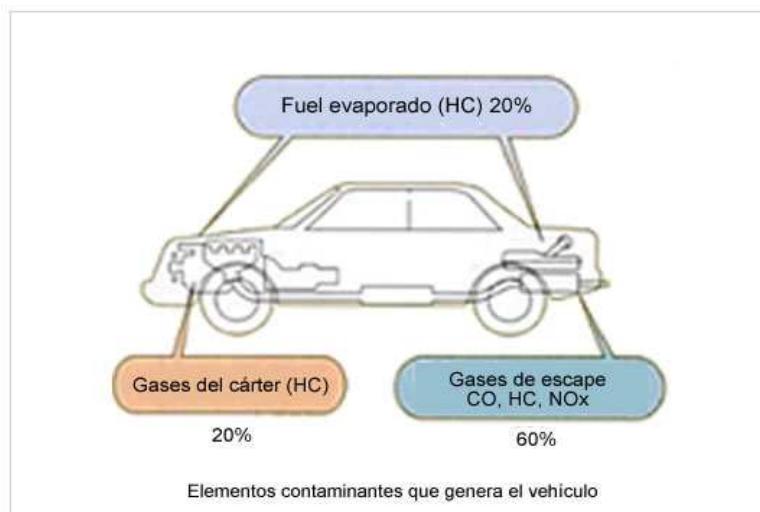


Imagen 124. Elementos contaminantes generados en el vehículo por lugar de origen

Los sistemas de control de emisiones de escape han sido desarrollados para reducir los elementos contaminantes generados por el automóvil en el proceso de combustión.

Dentro de los sistemas de control de emisiones destacan los siguientes:

#### **4.2.5.2.1.- Catalizador**

El catalizador o convertidor catalítico se ha convertido en un elemento primordial a la hora de tratar los gases perjudiciales que salen por el tubo de escape de los automóviles. El catalizador tiene como misión disminuir los elementos contaminantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de la catálisis.

El catalizador es un dispositivo, que se monta en el tubo de escape, inmediatamente después del colector de escape, ya que en este punto los gases se mantienen una temperatura elevada. Esta energía calorífica pasa al catalizador y eleva su propia temperatura, circunstancia indispensable para que este dispositivo tenga un óptimo rendimiento, que se alcanza entre los 400 y 700º C.



Imagen 124. Localización del catalizador

La depuración actual de los gases de escape de los motores de gasolina se realiza por medio de catalizadores. La regulación del ciclo de depuración catalítica corre a cargo de la unidad de control del motor.

La sonda lambda transmite a la unidad de control del motor las señales correspondientes al contenido de oxígeno en los gases de escape. La unidad de control del motor se encarga de mantener ajustada la mezcla de combustible/aire a una proporción "lambda = 1".

El catalizador despliega su efecto de depuración a partir de una temperatura de aprox. 300 grados y requiere un cierto tiempo para alcanzar su temperatura de servicio después del arranque en frío. En los sistemas de escape actuales se implantan precatalizadores para abreviar la fase de calentamiento y poder depurar los gases de escape después de un tiempo mínimo. Estos precatalizadores se instalan cerca del colector de escape, tienen generalmente unas dimensiones más pequeñas y alcanzan por ello más pronto su temperatura de servicio.

### Estructura

El catalizador está constituido por una carcasa de acero inoxidable que contiene en su interior las sustancias catalizadoras. Sustancias químicamente activas, soportadas por un monolito (colmena cerámica) recubierta por una capa amortiguadora que la protege de golpes.

Esta colmena está formada por millares de minúsculos canales (celdas) por donde pasan los gases de escape. Las paredes de estos canales generan una superficie de contacto equivalente a tres campos de fútbol. La capa soporte del catalizador incluye una serie de sustancias activas como óxidos de aluminio, metales nobles (catalíticamente activos): Platino, Rodio, Paladio, y promotores o retardadores específicos, que aumentan o retardan la acción catalítica de los anteriores, sobre determinadas reacciones.

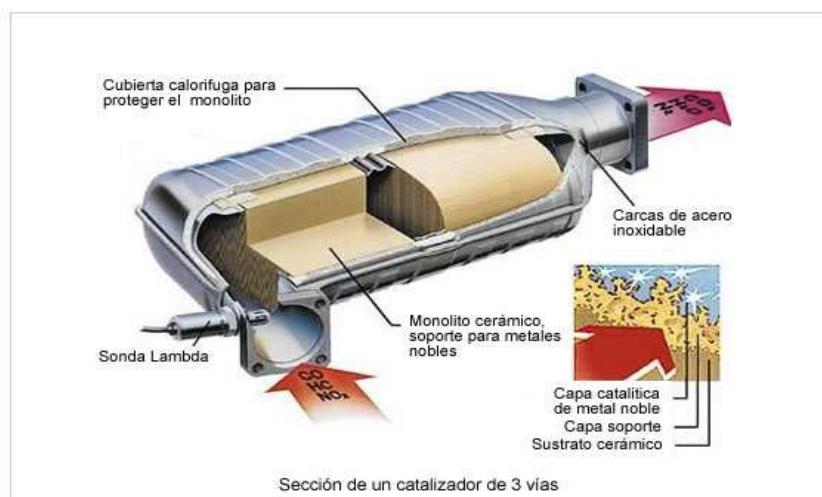


Imagen 125. Estructura catalizador de 3 vías

### El proceso de depuración catalítica

La depuración catalítica se basa en dos reacciones químicas:

- Reducción: extracción de oxígeno de los componentes de los gases de escape.
- Oxidación: adición de oxígeno a los componentes de los gases de escape (recombustión).

### Tipos de catalizadores

Según el sistema de funcionamiento, los catalizadores pueden ser de tres tipos:

**Catalizador oxidante:** En muchos libros se le denomina también catalizador de "dos vías" porque trata dos gases. Es el catalizador más sencillo y barato,. Dispone de un solo soporte cerámico que permite la oxidación del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC).

En la figura se ve un catalizador oxidante utilizado en un motor turbodiesel con gestión electrónica. El óxido de nitrógeno (Nox) no se ve afectado por este tipo de catalizadores de ello se encarga el sistema EGR.



Imagen 126. Catalizador por oxidación

Las prestaciones de estos tipos de catalizadores sobre los gases de escape son difícilmente controlables. Se utilizan principalmente en motores Diesel. Las temperaturas máximas de los gases de escape en los motores diesel no permiten que se funda el monolito cerámico (al contrario que los motores de gasolina).

Estos catalizadores están constituidos:

De un monolito cerámico (1) en forma de nido de abeja. Sobre las paredes de este panel se deposita la sustancia que contiene metales preciosos (esencialmente platino).

De una malla metálica (2) que permite la sujeción del monolito en su coquilla.

De una envoltura (3) que incluye los conos de entrada y salida que permiten optimizar la repartición del flujo de los gases de escape.

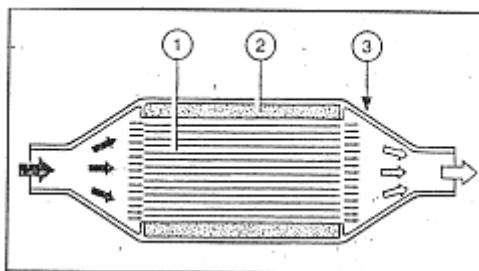


Imagen 127. Estructura interna de un catalizador oxidación

**Catalizador de dos vías:** Llamado tambien catalizador de tres vías de "bucle abierto". Solamente existe en vehículos de fabricación americana. También llamados de "doble efecto", o de "doble cuerpo", son en realidad un doble catalizador con toma intermedia de aire. El primer cuerpo actúa sobre los gases ricos de escape, reduciendo el oxido de nitrógeno (Nox), mientras el segundo lo hace sobre los gases empobrecidos gracias a la toma intermedia de aire, reduciendo el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos (HC). Precisa una mezcla rica o estequiométrica para funcionar.

El catalizador con toma intermedia de aire, tiene dos modos de funcionamiento:

-Cuando el motor esta frío: la alimentación del mismo se hace con una mezcla rica de combustible. Los gases de escape son entonces ricos en gasolina no quemada o parcialmente quemada (HC y CO). En esta condición la válvula envía aire al colector de escape para ayudar a completar la combustión de estos contaminantes. El oxígeno del aire adicional contribuye a que el HC se convierta en H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. De esta manera evita que el convertidor catalítico se sobrecargue.

-Cuando el motor se calienta: el interruptor de vacío es sensible a la temperatura del refrigerante motor y cierra el paso del vacío a la válvula de control de aire. En consecuencia se inyecta aire en la toma intermedia del catalizador para reducir los monóxidos de carbono (CO) y los hidrocarburos (HC).

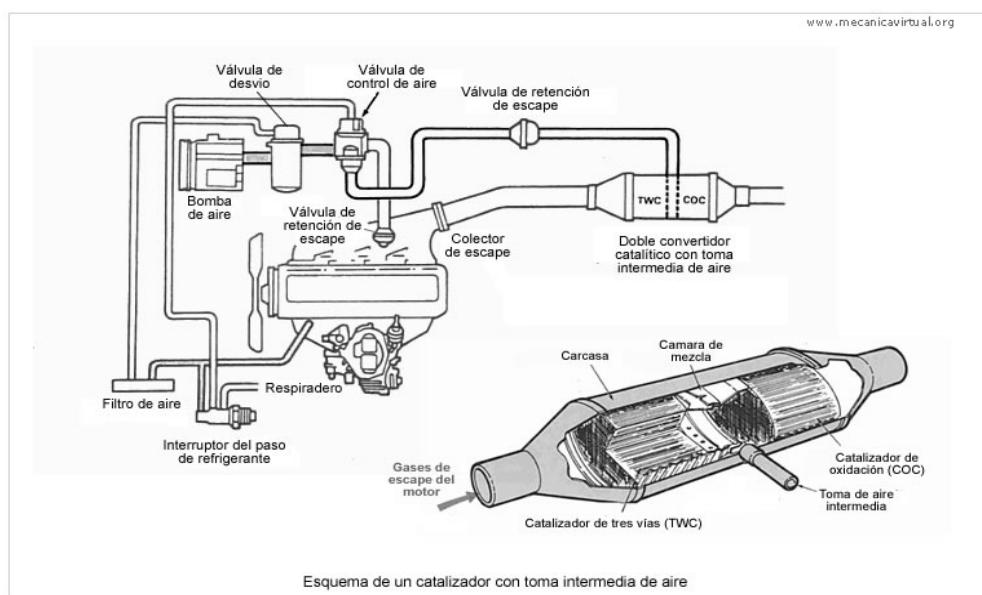


Imagen 128. Esquema de catalizador con toma intermedia de aire

El catalizador de toma intermedia recibe el aire que proporciona la bomba, en el espacio comprendido entre el catalizador de tres vías (TWC) y el catalizador de dos vías o de oxidación convencional (COC). El convertidor anterior está revestido con los metales rodio y platino. La combinación actúa sobre los NOx, y parcialmente sobre el HC y el CO. Los gases de escape parcialmente tratados entran después en el convertidor posterior. Entonces se mezclan con el aire que es inyectado por la bomba de aire a través de la toma intermedia. De esta manera se añade mas oxígeno a los gases de escape para que el catalizador de oxidación actúe sobre los HC y CO.

Hay que tener en cuenta que solo se alimenta con aire el catalizador cuando el motor trabaja a temperatura normal de funcionamiento. Cuando el motor esta frío, el aire se desvía al colector de escape antes del catalizador.

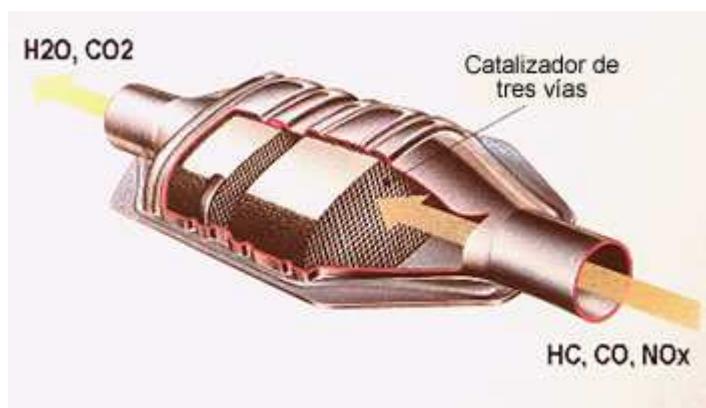


Imagen 129. Catalizador de 3 vías

**Catalizador de tres vías:** Tambien llamado de "bucle cerrado". Son los mas complejos, sofisticados y caros (siendo en la actualidad los mas usados), y su evolución tecnológica a 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 mas 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 funcione perfectamente los catalizadores de tres vias, es preciso que la mezcla aire-gasolina tenga la adecuada composición que se acerque lo mas posible a la relación estequiométrica (un kilo de gasolina por 14,7 Kg de aire).

Es, por 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.

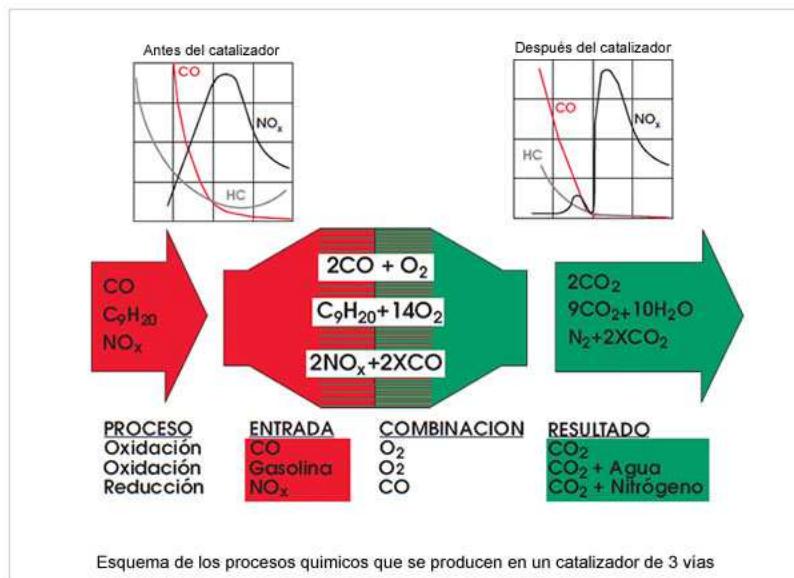


Imagen 130. Esquema de los procesos en un catalizador de 3 vías

Exteriormente los tres tipos de catalizadores son iguales, excepto el de dos vías con toma de aire, que dispone de un tubo para la entrada de aire entre los dos monolitos. La diferencia realmente estriba en el washcoat y en el tipo de materiales preciosos que utilizan.

### Constitución de los catalizadores de tres vías

Los catalizadores de tres vias como el que se ve en la figura inferior, son los utilizados en motores de gasolina alimentados mediante inyección electrónica. El catalizador se compone de un recipiente de chapa como cuerpo (6), un soporte (5) y el recubrimiento catalítico activo de metal precioso (4).

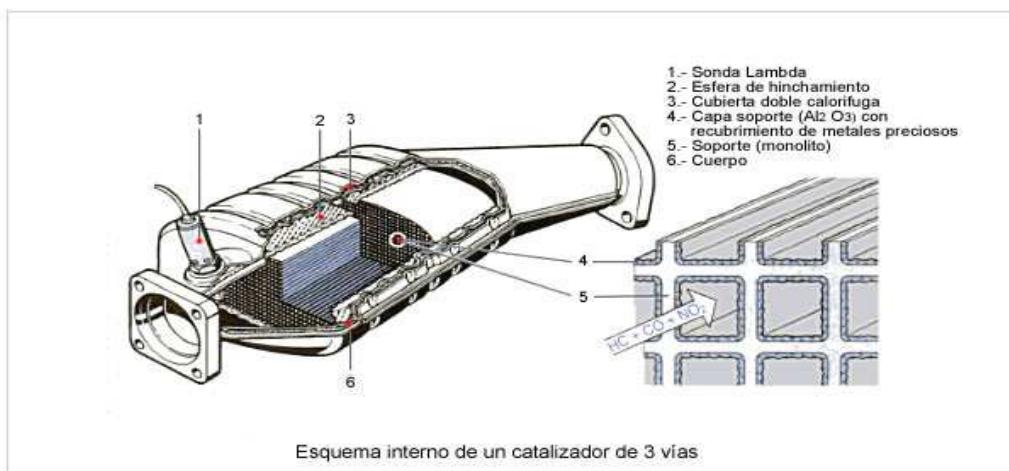


Imagen 131. Esquema interno de un catalizador de 3 vías

## Soporte

Como soporte se han impuesto dos sistemas:

### Monolitos cerámicos

Los monolitos cerámicos son cuerpos de cerámica atravesados por varios miles de pequeños canales, estos son recorridos por los gases de escape. La cerámica se compone de magnesio-aluminio-silicato y es resistente a altas temperaturas. El monolito, que reacciona de modo extremadamente sensible a tensiones mecánicas, está fijado dentro de un cuerpo de chapa. Para ello se emplean esteras minerales de hinchamiento (2), que en el primer calcinamiento se expanden permaneciendo en este estado y sirven al mismo tiempo de elemento estanqueizante frente a los gases de escape.

Los monolitos cerámicos actualmente son los soportes de catalizador aplicados con mas frecuencia.

### Monolitos metálicos

El catalizador metálico es una alternativa, al monolito cerámico. Consiste en un arrollamiento de una delgada hoja metálica finamente ondulada de 0,05 mm de espesor, habiendo sido soldado en un proceso de alta temperatura. Gracias a las delgadas paredes se pueden disponer más canales sobre una misma superficie. Eso significa una menor resistencia para los gases de escape, lo que aporta ventajas para la optimización del rendimiento de motores de alta potencia.

## **Recubrimiento**

Los monolitos cerámicos y metálicos requieren una capa de soporte de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de la capa soporte (4). Esta capa aumenta la superficie activa del catalizador por el factor 7000. La capa catalítica activa aplicada en catalizadores de oxidación contiene los metales preciosos de platino y/o paladio; en catalizadores de tres vías, adicionalmente contiene rodio. El platino y el paladio aceleran la oxidación de los hidrocarburos y monóxido de carbono; el rodio, la reducción de los óxidos de nitrógeno.

El contenido de metales preciosos en un catalizador es de aprox. 1... 3 g. Este valor depende de la cilindrada del motor.

## **Condiciones de servicio**

### Temperatura de servicio

La temperatura del catalizador tiene muchísima importancia en la depuración de los gases de escape. En el catalizador de tres vías no se inicia una conversión de los contaminantes digna de mención hasta alcanzarse una temperatura de servicio de más de 300°C. Para altas cuotas de conversión y una larga duración reinan condiciones de servicio ideales en el margen de temperaturas de 400...800 °C. El envejecimiento térmico aumenta notablemente en el margen de 800...1000°C por sinterización de los metales preciosos y de la capa de soporte ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) lo que ocasiona una reducción de la superficie activa. El tiempo de servicio también tiene gran influencia en este margen de temperatura. Por encima de 1000°C el envejecimiento térmico aumenta enormemente y ocasiona la casi completa ineficacia del catalizador.

Por funcionamiento incorrecto del motor (p.ej. fallos del encendido), puede subir la temperatura en el catalizador hasta 1400°C. Tales temperaturas causan la destrucción total del catalizador por fusión del material de soporte. Para impedirlo, particularmente el sistema de encendido ha de trabajar de modo muy fiable y exento de mantenimiento, los modernos mandos del motor pueden identificar fallos del encendido y de la combustión. Estos mandos impiden en caso dado la inyección para el correspondiente cilindro, no llegando así mezcla alguna sin quemar al sistema de escape

### Combustible sin plomo

Otra condición para un servicio fiable de larga duración es el funcionamiento del motor con combustible sin plomo. Los compuestos de plomo se posan en los poros de la superficie activa o se depositan directamente sobre ellos y reducen su cantidad. Pero tambien residuos del aceite motor pueden "envenenar" el catalizador, es decir, destruirlo hasta inutilizarlo.

### Lugar de montaje

Las severas prescripciones sobre gases de escape exigen conceptos especiales para el calentamiento del catalizador al arrancar el motor. Esos conceptos (p.ej. insuflación de aire secundario, variación del ángulo de encendido en dirección hacia "retardo") determinan el lugar de montaje del catalizador. Las propiedades del catalizador de tres vías respecto a la temperatura de servicio limitan la posibilidad de montaje. Partiendo de las condiciones térmicas necesarias para una alta transformación, es indispensable montar el catalizador de tres vías cerca del motor.

Para el catalizador de tres vías se ha impuesto en lo esencial su disposición dividida con un catalizador previo cerca del motor y un catalizador debajo del piso, los catalizadores dispuestos cerca del motor requieren una optimización del recubrimiento en el sentido de estabilidad respecto a altas temperaturas; los catalizadores bajo el piso, en el sentido de "low light off" (baja "temperatura de arranque"), así como una buena transformación de NOx.

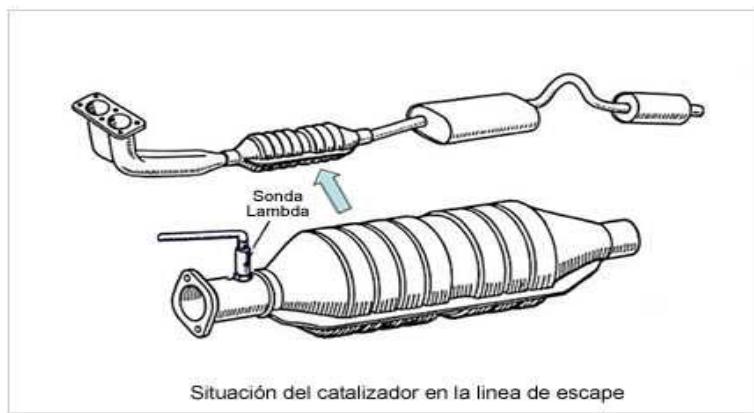


Imagen 132. Situación del catalizador en la línea de escape

## Efectividad

El tratamiento ulterior de los gases de escape con ayuda del catalizador de tres vías en la actualidad es el procedimiento de depuración de gases de escape mas eficaz para el motor de gasolina con distribución homogénea de la mezcla  $\text{Lambda} = 1$ . Una parte integrante es la regulación lambda, que vigila la composición de la mezcla de aire y combustible. Con el catalizador de tres vías se puede impedir casi por completo la expulsión de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, con una distribución homogénea de la mezcla y una composición estequiométrica de ésta. Estas condiciones ideales de servicio, sin embargo, no se pueden mantener siempre. Ello no obstante, se puede partir por término medio de una reducción de los contaminantes del mas del 98%.

### **4.2.5.2.1.1.- Catalizadores para sistemas inyección directa de gasolina**

El sistema de escape ha sido adaptado a las exigencias de un motor con inyección directa de gasolina. 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 nítricos (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.

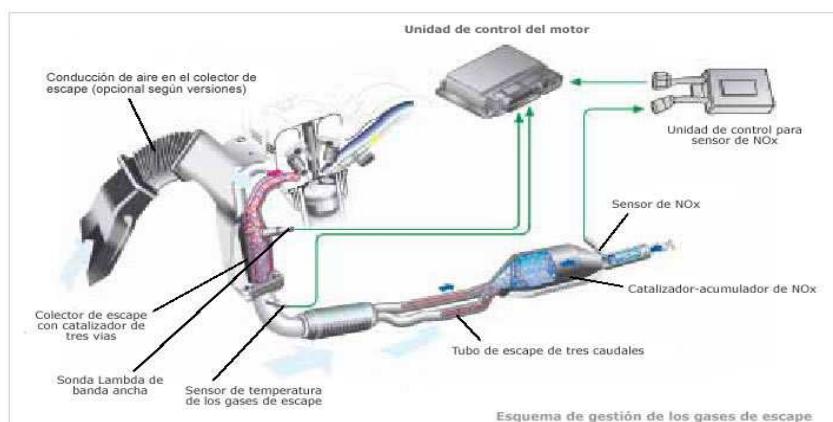


Imagen 133. Procesos de la línea de escape con catalizadores

Nota: con la recirculación de gases de escape y el reglaje de distribución variable ya se reducen las emisiones de óxidos nítricos desde la propia combustión, antes de llegar al sistema de escape.

### **Catalizador acumulador de Nox**

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 bárico). Todas 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 NO2 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.

### Desulfatación

El azufre que contiene el combustible reacciona también con el material de acumulación en las capas del catalizador. Se forman sulfatos (p.ej. sulfato de bario), que son muy resistentes a la temperatura. Mediante unas medidas apropiadas (p.ej. ajustar el modo de funcionamiento del calentamiento estratificado del catalizador u otros métodos de calentamiento químico), el catalizador debe calentarse a  $> 650^\circ\text{C}$  y entonces admitir alternativamente durante unos minutos gases de escape ricos ( $\lambda = 0,95$ ) y pobres ( $\lambda = 1,05$ ). De esta forma se reducen de nuevo los sulfatos.

Una condición límite importante para los métodos de calentamiento es que el precatalizador no se caliente debido a la aportación del calor necesario para calentar el catalizador acumulador de NOx, en una posición por debajo del nivel.

#### **4.2.5.2.5.2.-Sistema SCR (Reducción Catalítica Selectiva)**

SCR es una tecnología que utiliza un fluido para el sistema de escape basado en urea (DEF) y un convertidor catalítico, para reducir significativamente emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx). SCR es la tecnología principal que está siendo usada para cumplir con las regulaciones de emisiones 2010 en US.

El propósito del sistema SCR es reducir los niveles de NOx (óxidos de nitrógeno emitidos por el motor) que son dañinos para la salud y el medio ambiente. SCR es la tecnología de post-tratamiento que trata los gases de salida del motor.

Pequeñas cantidades de Fluido para sistemas de Escape a Diesel (DEF) son inyectadas al flujo caliente de los gases de escape, donde se vaporiza y se descompone formando amoniaco y dióxido de carbono. El amoniaco (NH<sub>3</sub>) es el producto que en conjunto con el sistema catalítico SCR, convierte los óxidos de nitrógeno (NOx) en Nitrógeno (N<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O).

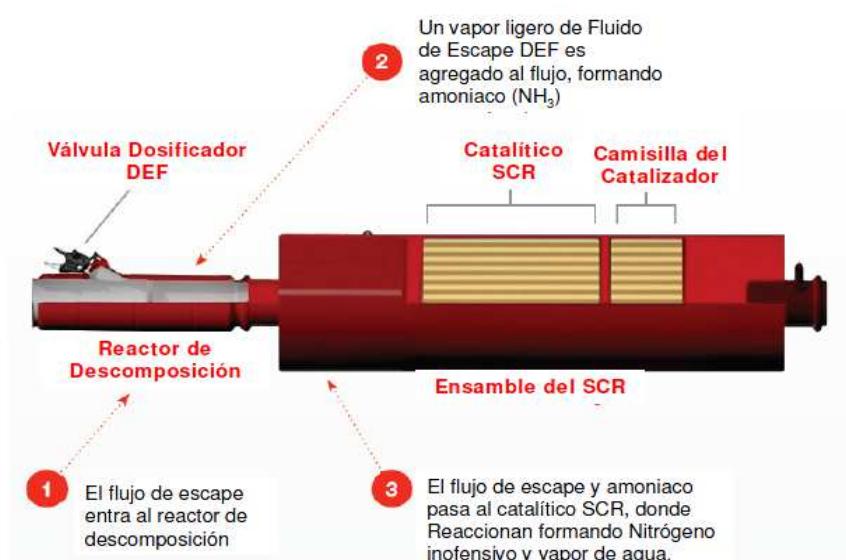


Imagen 134. Sistema SCR

Un reductor gaseoso, normalmente amoniaco o urea es añadido a una corriente de fluido o de gas de escape y es absorbido en un catalizador. El CO<sub>2</sub> es el producto de la reacción cuando la urea es usada como reductor.

La reducción catalítica de NOx comenzó a usarse en EE.UU por la Englehard Corporation en 1957. El desarrollo continuó en Japón y en los Estados Unidos al inicio de los 60 con la búsqueda de agentes con mayor vida útil y menos caros.

El uso a gran escala fue promovido por la IHI Corporation in 1978.

### Química del proceso

La reacción de reducción tiene lugar cuando los gases pasan a través de la cámara de catalizador.

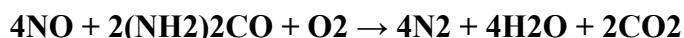
Antes de entrar en la cámara, el amoniaco o otro reductor (como la urea) es inyectada y mezclada con los gases. La ecuación para una reacción estequiométrica usando amoniaco es la siguiente:



Con varias reacciones secundarias:



La reacción con urea en vez de con amoniaco es:



La reacción ideal se genera en un rango de temperaturas de entre 630 y 720 K, pero puede operar desde 500 hasta 720 K.

Otros posibles reductores pueden ser el ácido cianurico y el sulfato de amonio.

### **Catalizadores de SCR**

Los catalizadores son producidos en materiales ceramicos, como óxido de titanio, y los componentes catalíticos activos son tanto óxidos como metales (vanadio, molibdeno y tungsteno) o metales preciosos.

Cada componente tiene ventajas y desventajas.

Los catalizadores como el vanadio o el tungsteno, tienen una durabilidad termica baja, pero son menos caros y operan bien con rangos de temperaturas comunmente vistos en la industria.

La durabilidad térmica es particularmente importante en las aplicaciones automovilisticas del SCR, que incorporan el uso de filtros de partículas con regeneración forzada. También tienen un alto potencial de oxidación el SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>, que puede ser extremadamente dañino debido a sus propiedades ácidas.

Con respecto al tipo, la mayor parte de los catalizadores son de tipo poroso, ya que esta porosidad es la que genera ese área para la reducción del NO<sub>x</sub>. Los sistema SCR según fuentes, llegan a reducir entre un 65 y un 99 % los niveles de NO<sub>x</sub>.

La aplicación a motores Diesel es relativamente reciente. En EE.UU por ejemplo los fabricantes de camiones y vehículos pesados se han decantado por el uso del SCR.

Estos motores requieren añadir el denominado Diesel Exhaust Fluid [82](DEF, que es una solución de urea) básico en el funcionamiento. Actualmente este compuesto que más abajo pasamos a comentar se denomina comercialmente AdBlue. Este componente es fácilmente adquirible en botellas en la mayoría de las gasolineras americanas. También ha sido usado este sistema en el Passat TDI [83] de este año.

La aplicación en los Estados Unidos se basa en las restricciones de emisiones de la EPA [84]. El problema de este sistema es su carácter controvertido, ya que los conductores no suelen tener un piloto que indique el nivel de urea en el salpicadero, de modo que si el depósito queda vacío, el sistema SCR deja de limitar la emisión del NO<sub>x</sub>, incumpliendo en ese momento el vehículo las restricciones gubernamentales.

Otro de los objetivos actuales es el acceso público a la urea, y ya es posible ver en algunas gasolineras españolas el depósito de AdBlue [85] para camiones y vehículos que incorporen la tecnología.

## **AdBlue**

AdBlue es la marca registrada del producto AUS32 (disolución de urea al 32.5%), utilizado para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) causadas por los escapes de los motores diésel, mediante un proceso denominado reducción catalítica selectiva (RCA).

Como sugiere el propio nombre AUS32 (Aqueous Urea Solution en inglés), el producto es una disolución de urea de alta pureza en agua desmineralizada. Es claro, no es tóxico y es seguro de manipular. En cambio puede resultar corrosivo para algunos metales, y deben utilizarse los materiales adecuados para su transporte y almacenamiento. AdBlue es una marca registrada de la Asociación Alemana de la Industria del Automóvil [86], quienes garantizan el cumplimiento de los estándares de calidad según las especificaciones recogidas en la ISO 22241 [87].

El AdBlue lo utilizan los vehículos equipados con tecnología RCA, en los que el producto va almacenado en un depósito exclusivo. El consumo de AdBlue equivale a un 3-5% del consumo de combustible. Esta baja dosificación permite espaciar los repostajes y minimizar el impacto que produce en el chasis un depósito adicional. Los sistemas RCA están actualmente en uso en Europa, Japón, Australia, Hong-Kong, Taiwán, Corea, Nueva Zelanda y Singapur. La legislación en 2010 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)<sup>1</sup> limitará las emisiones de NOx a niveles que harán necesaria la tecnología SCR para los camiones de Norteamérica. El nombre genérico que se le da al producto AUS32 en Norteamérica es DEF (siglas de diesel exhaust fluid). Algunos proveedores de equipamientos para la industria del transporte han desarrollado marcas propias de sistemas SCR, como el BlueTec de Daimler.

Todos los fabricantes europeos de camiones están sacando al mercado modelos equipados con RCA, y la futura normativa sobre emisiones Euro VI supondrá una mayor demanda de esta tecnología en Europa. Los sistemas RCA son muy sensibles a posibles impurezas químicas en la disolución de urea, por lo que es esencial cumplir las elevadas exigencias de calidad del AdBlue recogidas en la norma ISO 22241.

El uso de la tecnología RCA en Europa ha hecho necesaria la creación de una infraestructura de suministro de AdBlue. El AdBlue está disponible en miles de estaciones de servicio; este localizador se actualiza todos los meses incorporando los nuevos puntos de venta de AdBlue al por menor.<sup>2</sup> Se puede adquirir igualmente en garrafas de 5 o 10 litros, o en cantidades mayores, por ejemplo bidones de 210 litros, contenedores IBCs (Intermediate Bulk Containers) de 1.000 litros, o en granel.

Actualmente los vehículos que más usan esta tecnología son los camiones y vehículos pesados.

#### **4.2.5.2.1.3.-Filtro de partículas (motores Diesel)**

Las partículas (hollín) generadas por un motor Diesel son perceptibles por el denso humo negro que deja tras de sí un vehículo propulsado por este tipo de motor en plena aceleración. El gasóleo está formado por cadenas de hidrocarburos mucho mayores y pesadas que la gasolina. Cuando el motor trabaja a cargas medias y bajas se inyecta muy poco combustible en comparación con el aire introducido en los cilindros, de modo que en todo el volumen de la cámara hay una gran cantidad de oxígeno para completar la combustión. Sin embargo, cuando se hace trabajar el motor a plena carga (por ejemplo, en una aceleración), puede ocurrir que una parte de la gran cantidad de combustible inyectada no encuentre en sus inmediaciones un volumen suficiente de oxígeno como para terminar la oxidación, haciendo que queden tras la combustión largas cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidadas, que tienden a reagruparse y formar el hollín.



PM = Particulas de materia

Imagen 135. Filtro de partículas Diesel

En el proceso de la combustión en un motor diesel se producen partículas de hollín. Son esferas microscópicas de carbono, con un diámetro aproximado de  $0,05 \mu\text{m}$ . En su núcleo constan de carbono puro. En este núcleo se asocian diversas combinaciones de hidrocarburos, óxidos metálicas y azufre. Ciertas combinaciones de hidrocarburos se catalogan como sustancias críticas para la salud.

La composición exacta de las partículas de hollín depende de la tecnología aplicada en el motor, las condiciones de aplicación y el combustible empleado.

En lo que respecta a los efectos nocivos para el medio ambiente y la salud de las personas, los gases de escape del motor diésel contienen diversos componentes contaminantes. Ademas de los componentes contaminantes que emiten los motores Otto, el motor Diesel suma a estos, el dióxido de azufre y las partículas de hollín.

El dióxido de azufre: tiene su origen al quemarse un combustible con contenido de azufre. Es un gas incoloro, de olor penetrante. Los contenidos de azufre en los combustibles vienen siendo cada vez menores.

Partículas de hollín: estas partículas se producen por falta de oxígeno a causa de una combustión incompleta.

#### **Formación de las partículas de hollín**

El origen de las partículas de hollín en el motor diésel está supeditado a las diferentes operaciones que caracterizan a la combustión en el motor diésel, como son la alimentación de aire, la inyección o la propagación de la flama. La calidad de la combustión depende del modo en que se genere la mezcla de combustible y aire. Puede suceder que la mezcla sea demasiado rica en determinadas áreas de la cámara de combustión, por no haber suficiente oxígeno disponible. En ese caso la combustión se mantiene incompleta y se produce la generación de partículas de hollín.

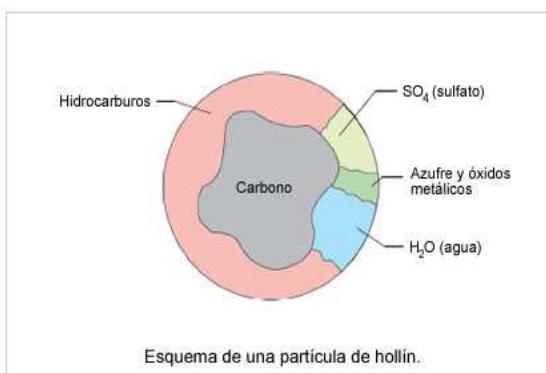


Imagen 136. Esquema de una partícula de hollín

La masa de las partículas y su cantidad dependen básicamente, por tanto, de la calidad de la combustión en el motor. El sistema de inyección por inyector-bomba trabaja con alta presión y tiene un desarrollo de la inyección que corresponde con las necesidades del motor para contar con una combustión eficiente, con lo cual viene a reducir la generación de partículas de hollín en el proceso de la combustión.

Una alta presión de la inyección y la correspondiente fina pulverización del combustible, sin embargo, no conducen necesariamente a que las partículas sean más pequeñas.

En mediciones se ha manifestado, que el reparto de los tamaños de las partículas en los gases de escape es independiente del principio de combustión aplicado en el motor, es decir, que son muy parecidos los resultados, indistintamente de que se trate de motores de cámara de turbulencia, common rail o inyector-bomba.

Para eliminar las partículas es necesario crear condiciones para el auto-encendido de una combustión lenta que las transforme en CO<sub>2</sub>, agua y óxidos de nitrógeno. Se usa entonces un filtro en seco, una trampa que retiene las partículas y que con el paso del tiempo se atasca. El consiguiente aumento de la presión y de la temperatura produce el auto-encendido de la combustión lenta que quema todas las partículas, con lo que se vacía el filtro, regenerándolo. Los productos resultantes de la reacción son: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y H<sub>2</sub>O.

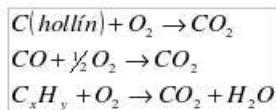


Imagen 137. Transformación química de compuestos

El calentamiento del gas se consigue inyectando una dosis suplementaria de combustible que se quema en contacto con el gas caliente, afectando a una buena parte de la carbonilla (post-combustión).



Imagen 138. Línea de escape con post-tratamiento

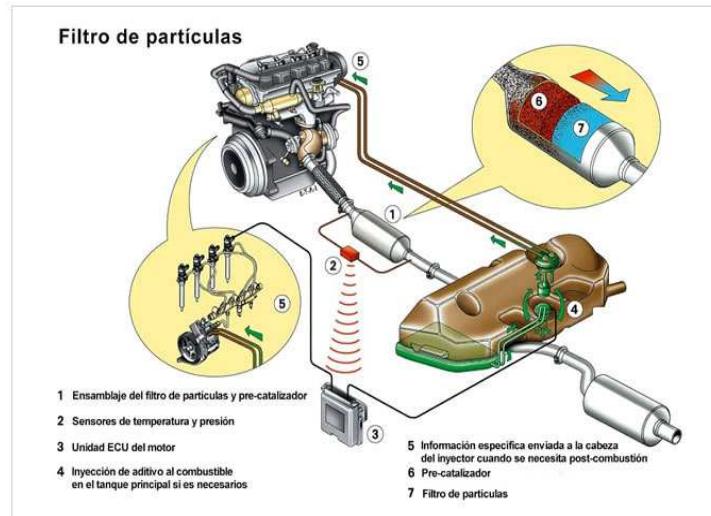


Imagen 139. Regulación de línea de escape con Post-tratamiento

### **Medidas para la reducción de las emisiones de partículas**

Existe una serie de soluciones técnicas para la reducción de las emisiones de escape. A este respecto se diferencia entre las medidas endomotrices y las ectomotrices.

#### Medidas endomotrices

Consisten en una optimización eficaz de la combustión para que no se genere desde un principio sustancias contaminantes.

A las medidas endomotrices pertenecen:

- La geometría específica de los conductos de admisión y escape, para establecer condiciones de flujo óptimas.
- Altas presiones de inyección por medio de la tecnología de inyectores-bomba.
- La geometría específica de la cámara de combustión, por ejemplo, la reducción del espacio nocivo y el diseño específico de la cámara en la cabeza del pistón.

#### Medidas ectomotrices

- Consisten en la reducción de las partículas de hollín por medio de un sistema de filtración en los gases de escape.

Se distinguen dos diferentes sistemas:

- Filtro de partículas Diesel con aditivo.
- Filtro de partículas Diesel sin aditivo.

#### Sistema con aditivo

Este sistema se implanta en vehículos con el filtro de partículas alejado del motor. Debido al largo recorrido de los gases escape entre el motor y el filtro de partículas, la temperatura de encendido necesaria para la combustión de las partículas sólo se puede alcanzar agregando un aditivo.

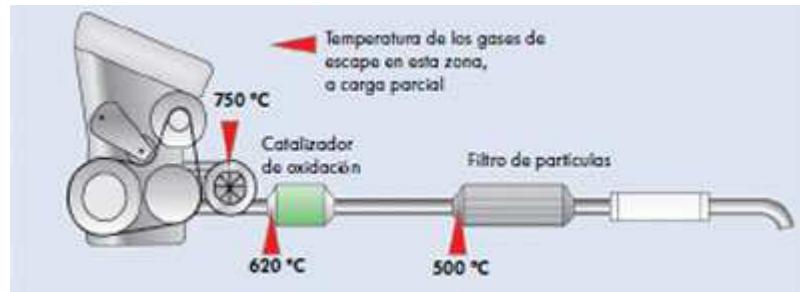


Imagen 140. Filtro con aditivo

#### Sistema sin aditivo

Este sistema está implantado, en vehículos con el filtro de partículas instalado cerca del motor. El corto recorrido de los gases de escape entre el motor y el filtro de partículas permite que la temperatura de los gases de escape todavía sea suficientemente alta para la combustión de las partículas.

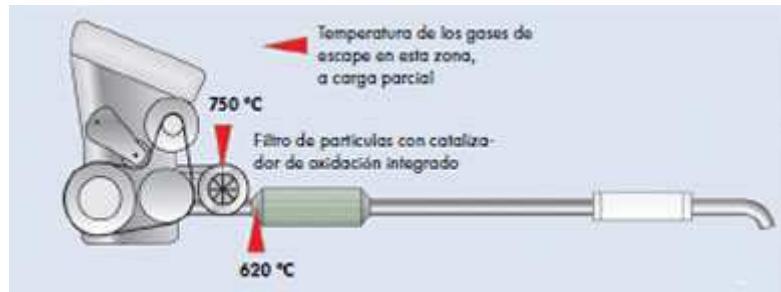


Imagen 141. Filtro sin aditivo

#### **4.2.5.2.1.4.- Sistema de inyección adicional de aire en el escape**

El sistema de inyección de aire en el escape es un dispositivo postcombustión, cuyo objetivo es introducir un cierto volumen de aire en el colector de escape, con el fin de completar la combustión de los gases expulsados del cilindro, antes de su salida al exterior. El oxígeno aportado de esta manera se combina fácilmente con los hidrocarburos que salen del cilindro sin quemar a gran temperatura, completando su combustión, y con el monóxido de carbono, transformandolo en bióxido de carbono. Así, pues, este sistema reduce el contenido de HC y CO de los gases de escape. Los motores que trabajan con mezcla rica son los que necesitan del sistema de inyección de aire, ya que no se quema todo el combustible en los cilindros, sobre todo cuando el motor arranca en frío, durante los primeros kilómetros. Por lo tanto el sistema de inyección de aire en el escape se utiliza en los motores Otto (gasolina) y no en los motores Diesel, que trabajan con mezclas pobres con exceso de aire.

Los primeros motores que utilizaron el sistema de inyección de aire utilizaban dos sistemas: bomba de aire y válvula de pulsair.

Las bombas de aire: generalmente utilizadas son del tipo rotativo de paletas, en las que el caudal y la presión de envío son proporcionales a la velocidad de rotación. El movimiento lo toman del motor, por medio de una correa trapezoidal generalmente. En su funcionamiento, la bomba toma aire a través del propio filtro del motor y lo envía a presión al colector de escape, a través de una válvula de retención, que permite el paso del aire solamente en el sentido bomba-escape. Una segunda válvula, llamada de derivación, interrumpe el funcionamiento de la primera y la inyección del aire en el escape en las fases de retención del motor, momento éste en que no es necesario.

El sistema de válvula pulsair: es más sencillo que el anterior y no requiere para su funcionamiento el empleo de bomba de aire, con lo cual resulta más económico y por ello fue el más utilizado en el pasado. El pulsair es una válvula oscilante en la que una membrana de acero obtura o libera un conducto de paso. Las oscilaciones de la membrana se producen gracias a las pulsaciones de los gases de escape en su recorrido hacia el exterior. Las variaciones de presión en el sistema de escape se producen como consecuencia de las aperturas cíclicas de las válvulas y, como en los motores de cuatro cilindros (los más utilizados) hay un sincronismo de ellos dos a dos, se utiliza normalmente una válvula pulsair para cada dos cilindros, a cuyos colectores de escape se conectan por un lado.

En el funcionamiento del motor, la salida de gases quemados del cilindro en el tiempo de escape, genera una presión que se aplica a la válvula pulsair, cuya membrana obtura el paso de aire en este momento. Inmediatamente después del cierre de la válvula de escape, la velocidad adquirida por los gases provoca una depresión en la válvula pulsair (del lado conectado al colector de escape), cuya membrana se deforma, permitiendo el paso del aire desde el filtro hacia el sistema de escape.

En combinación con la válvula pulsair se dispone una válvula de derivación que interrumpe la inyección de aire en las fases de deceleración del motor para evitar detonaciones en el escape.

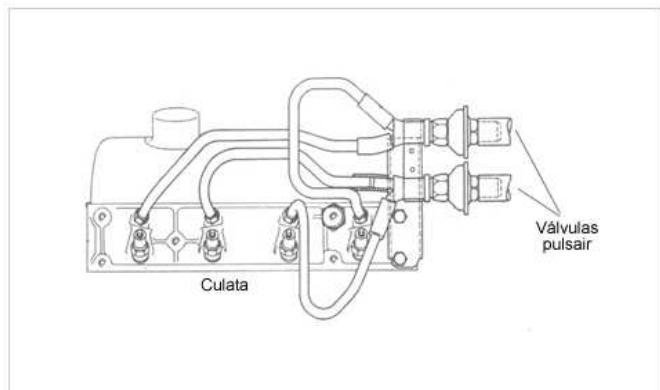


Imagen 142. Válvulas Pulsair

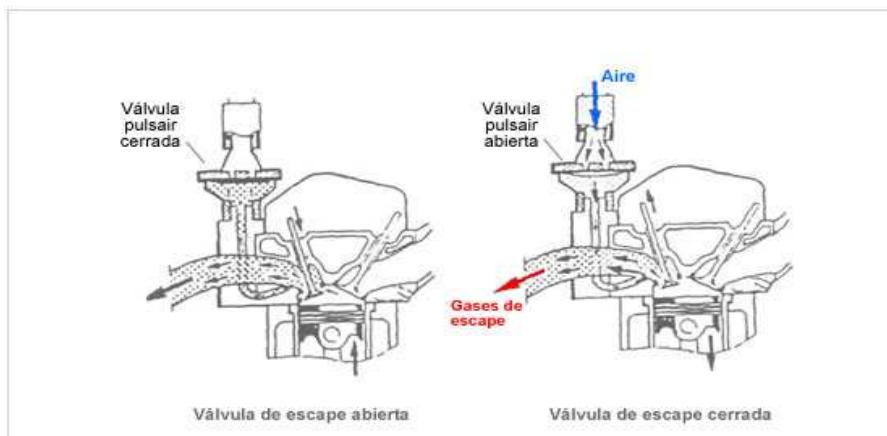


Imagen 143. Válvula pulsair abierta y cerrada

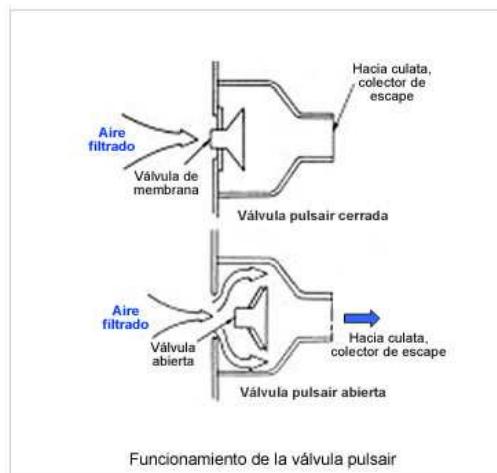


Imagen 144. Funcionamiento válvula Pulsair

### Gestión electrónica de la inyección de aire en el escape

Con la llegada de la gestión electrónica al sector del automóvil, la inyección de aire en el escape empezó a ser controlado mediante sistemas electrónicos. En estos sistemas la bomba que impulsa de aire es de accionamiento eléctrico. Las válvulas que abren y cierran el paso a la inyección de aire, son de accionamiento eléctrico combinadas con otras válvulas neumáticas.

En la figura inferior se ve un esquema de estos, donde una bomba de aire eléctrica (1) aspira aire a través del filtro de aire (8) del motor, este aire impulsado por la bomba se envía al colector de escape del motor, pero antes tiene que atravesar por una válvula de corte neumática (2) controlada por vacío. La válvula de corte es controlada a su vez por la electroválvula de control (4) que recibe órdenes de la ECU (Unidad Electrónica de Control del motor). La electrovalvula de control esta conectada al colector de admisión donde transmite el vacío que se crea bajo la mariposa y lo transmite a la válvula de corte cada vez que se lo ordena la ECU. La válvula de aire (3) recibe el aire de la bomba y lo envía al escape del motor. Esta válvula evita que la contrapresión del escape pueda retroceder a través del circuito de aire.

## Análisis y estudio de Sistemas de Aumento de Rendimiento Y Reducción de Emisiones en MACI

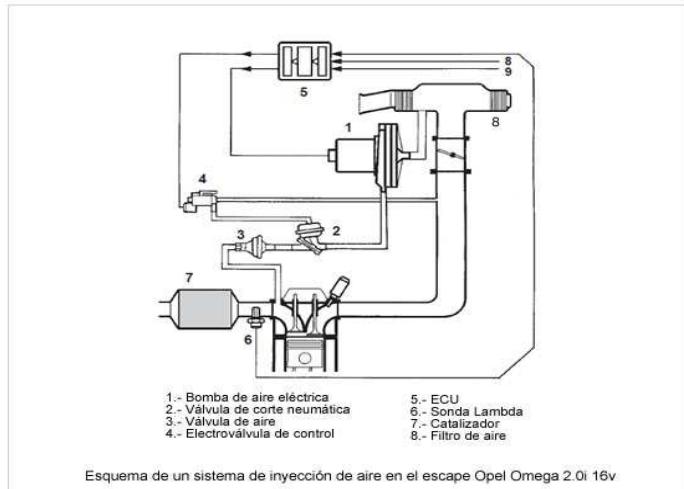


Imagen 145. Esquema de un sistema con inyección del aire en el escape

En el esquema inferior se puede ver un sistema moderno de inyección gasolina Motronic de un VW Beetle [88] 2.0 ltr. El funcionamiento del sistema de inyección de aire en el escape, es igual que el anterior, en este caso, la válvula combinada para el aire secundario (20), reúne en un mismo conjunto la válvula de corte y la válvula de aire.

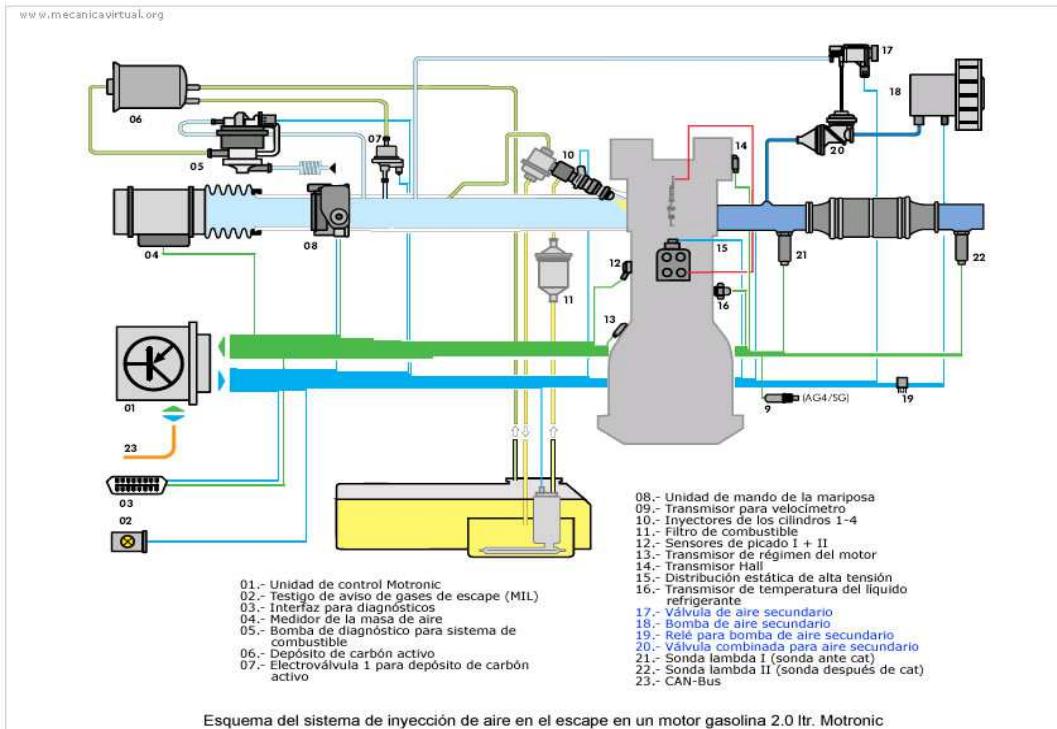


Imagen 146. Esquema del sistema de inyección de aire en el escape Motronic

## Funcionamiento

En la fase de arranque en frío de un motor son relativamente elevadas las concentraciones contaminantes de hidrocarburos sin quemar, ya que no hay oxígeno suficiente para quemar todo el combustible, no habiéndose alcanzado todavía la temperatura de servicio del catalizador.

Para reducir las emisiones contaminantes en esta fase se utiliza el sistema de aire secundario. Inyectando aire (secundario) adicional en los gases de escape se enriquecen éstos con oxígeno. A raíz de ello se produce una recombustión térmica de las partículas de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos (HC) sin quemar que están contenidos en los gases de escape.

Por otra parte, el catalizador alcanza más rápidamente su temperatura de servicio, gracias al calor producido con la recombustión.

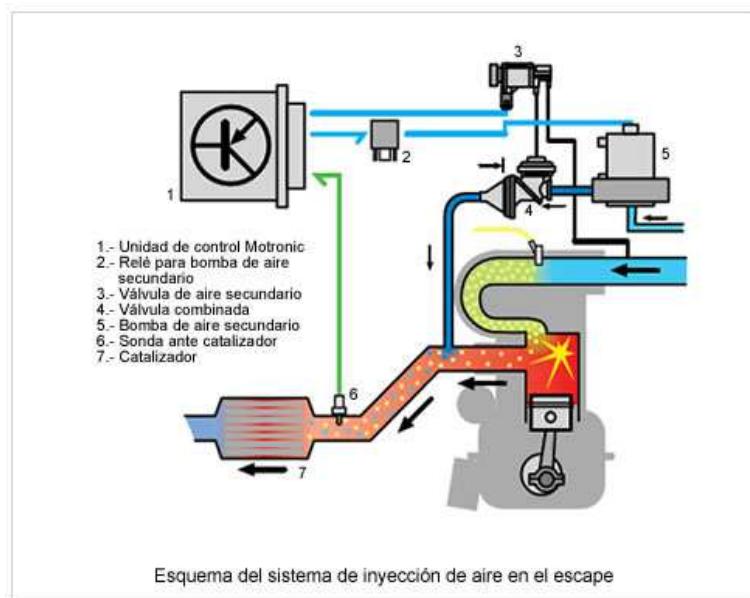


Imagen 147. Esquema del sistema de inyección de aire en el escape

Como se aprecia en la figura inferior a partir del filtro de aire (1) la bomba de aire secundario (2) sopla aire adicional directamente detrás de las válvulas de escape durante el arranque del motor.

El sistema trabaja en acción conjunta de los siguientes componentes:

- Unidad de control del motor (3)
- Relé para bomba de aire secundario (4)
- Bomba de aire secundario (2)
- Válvula de control de aire secundario (5)
- Válvula combinada (6)

Las magnitudes de entrada para la unidad de control del motor son:

- La temperatura del líquido refrigerante ( $t$ )
- La regulación lambda

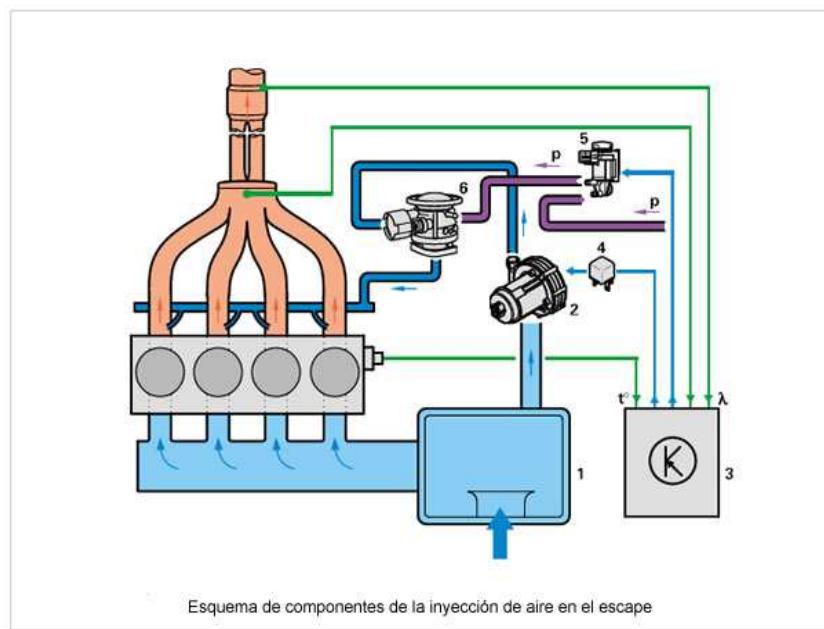


Imagen 148. Esquema de los componentes de un sistema de inyección de aire en el escape

### **Descripción de las funciones**

La bomba de aire secundario recibe tensión a través del relé que tiene asignado. La unidad de control del motor excita paralelamente la válvula de inyección de aire secundario, a través de la cual se acciona, entonces, la válvula combinada, por medio de la depresión “p”.

A través de la bomba de aire secundario se inyecta brevemente el aire en el flujo de los gases de escape, detrás de las correspondientes válvulas de escape.

En estado no activo, los gases de escape calientes también están aplicados a la válvula combinada. Esta válvula cierra el paso de los gases de escape hacia la bomba de aire secundario.

El sistema se comprueba por medio del autodiagnóstico, aprovechando la excitación.

La regulación lambda tiene que activarse durante esa operación, debido a que la mayor concentración de oxígeno en los gases de escape reduce la tensión de la sonda.

Estando intacto el sistema de aire secundario, las sondas lambda tienen que comprobar la existencia de una mezcla extremadamente pobre.

#### **4.2.5.2.1.5.- Control de la combustión ( sonda Lambda)**

El motor por si solo no puede controlar los porcentajes de aire y combustible que entran en la cámara de combustión, no lo pudo hacer en el pasado con el uso de carburadores, ni tampoco con sistemas de inyección electrónicos de "lazo abierto". Para poder controlar la mezcla es necesario de un elemento sensor, que indique, el porcentaje de aire y combustible que entra en el motor. A este dispositivo se le llama sensor de oxígeno o sonda Lambda. Este sensor situado a la salida del colector de escape del motor, analiza los gases de escape, y envía información constantemente a la gestión electrónica del motor que adecúa la mezcla en función de las circunstancias de funcionamiento del vehículo



Imagen 149. Sonda Lambda Bosch

## Localización de la sonda lambda en el motor

La sonda lambda esta dispuesta en el sistema de escape delante del catalizador. La señal de la sonda es conducida a la unidad de control del motor. Se pueden emplear sondas lambda de dos puntos o sondas lambda de banda ancha (regulación lambda permanente). Detrás del catalizador puede encontrarse otra sonda lambda (regulación con dos sondas). Esta sonda es siempre una sonda de dos puntos.

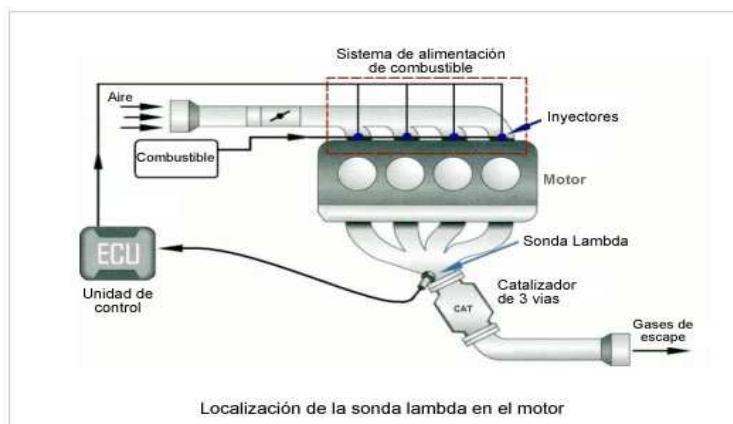


Imagen 150. Localización de la sonda Lambda

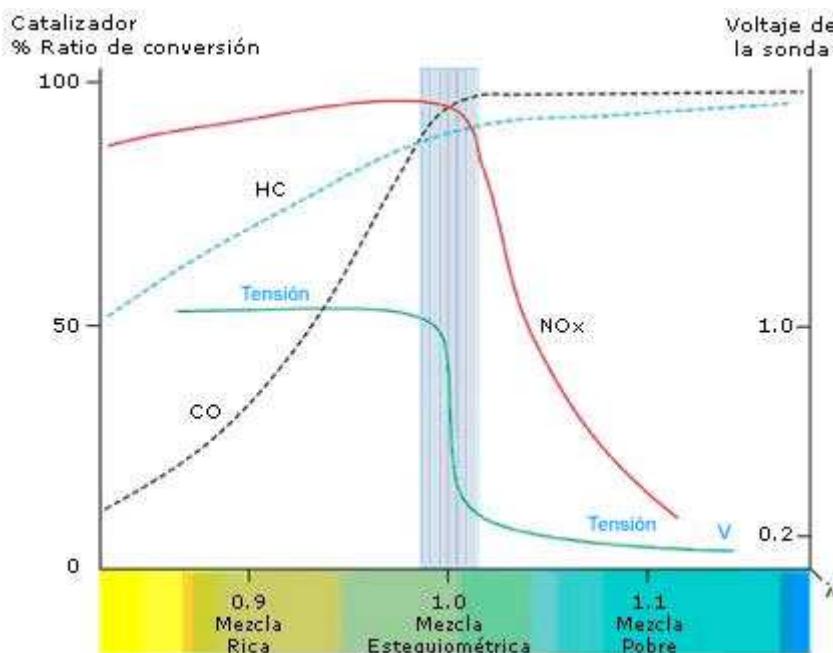
## Funcionamiento

Mediante el circuito de regulación formado con ayuda de una o dos sondas lambda pueden identificarse y corregirse desviaciones de una relación de aire y combustible determinada. El principio de regulación se basa en la medición del contenido de oxígeno residual en los gases de escape. El contenido de oxígeno residual es una medida para la composición de la mezcla de aire y combustible aportada al motor.

## Tipos de regulación

### Regulación de dos puntos

La sonda lambda de dos puntos dispuesta delante del catalizador suministra en el margen rico ( $\lambda < 1$ ) una tensión alta y en el margen pobre ( $\lambda > 1$ ), una tensión baja ( $U < 1$ ). En el margen alrededor de " $\lambda = 1$ " se produce un pronunciado salto de tensión. La sonda lambda de dos puntos sólo puede distinguir, pues, entre mezcla rica y mezcla pobre.



Gráfica 20. Relación entre la mezcla de combustible, el ratio de conversión de contaminantes del catalizador y el voltaje de la sonda

La tensión de sonda se transforma en la unidad de control del motor en una señal de dos puntos. Es la magnitud de entrada para la regulación lambda puesta en efecto con ayuda del software.

La regulación lambda actúa en la formación de la mezcla y ajusta la relación de aire y combustible adaptando el caudal de combustible inyectado. La magnitud de ajuste, compuesta de un salto y una rampa, varía su dirección de ajuste con cada salto de tensión de la sonda. Es decir, por el salto de la magnitud de ajuste varía la composición de la mezcla primero "de golpe" y a continuación en forma de rampa.

Si la tensión de la sonda es alta (mezcla rica), la magnitud de ajuste regula en dirección hacia mezcla pobre; si la tensión de la sonda es baja (mezcla pobre), en dirección hacia mezcla rica. Con esta regulación de dos puntos se puede regular la mezcla de aire y combustible a valores lambda alrededor de "lambda = 1".

La típica "medición errónea" de la sonda lambda, condicionada por la variación de la composición de los gases de escape, se puede compensar de modo controlado conformando la evolución de la magnitud de ajuste selectivamente de modo asimétrico (desplazamiento hacia mezcla rica/mezcla pobre).



Imagen 151. Funcionamiento de la sonda en bucle cerrado

#### Regulación lambda constante

La sonda lambda de banda ancha suministra una señal de tensión constante. De este modo se puede medir no sólo el margen lambda (mezcla rica o pobre), sino también las desviaciones de "lambda = 1". La regulación lambda puede reaccionar así más rápidamente a una divergencia de la mezcla. De ello resulta un mejor comportamiento de regulación, de elevada dinámica.

Como sea que con la sonda lambda de banda ancha de "lambda = 1" se pueden medir composiciones de la mezcla divergentes, también es posible (al contrario de la regulación de dos puntos) regular tales composiciones. El alcance de regulación comprende valores lambda dentro del margen de "lambda = 0,7 a 3,0". La regulación lambda constante por tanto es apropiada para el funcionamiento con mezclas pobres o ricas de motores de inyección directa de gasolina.

#### Regulación con dos sondas

La regulación lambda con la sonda antes del catalizador tiene una precisión limitada, ya que la sonda está expuesta a notables influencias medioambientales. La exposición de una sonda lambda detrás del catalizador a estas influencias es considerablemente menor. Por esta razón ademas de la sonda antes el catalizador se ha implantado una segunda sonda lambda (calefactada) en el sistema de escape después del catalizador. Sirve para comprobar el funcionamiento del catalizador. Adicionalmente se lleva a cabo una autoadaptación de la sonda antes el catalizador.

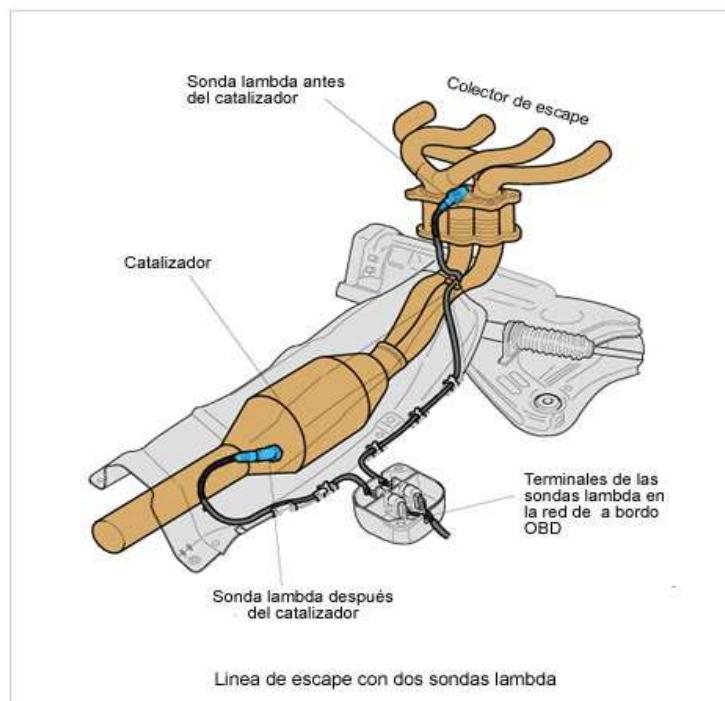


Imagen 152. Línea de escape con dos sondas lambda

El posicionamiento de las sondas lambda en el sistema de escape posee una gran importancia para la regulación de los gases de escape. Las sondas están expuestas a altos niveles de suciedad en los gases de escape. Después del catalizador, la sonda resulta menos expuesta a suciedad. Sin embargo, debido a los largos recorridos de los gases de escape, sería demasiado lenta la reacción de la regulación lambda si se instalara una sola sonda después del catalizador.

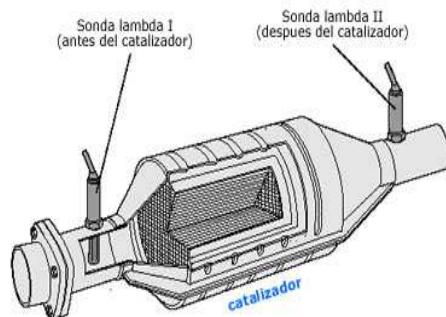


Imagen 153. Catalizador con dos sondas lambda

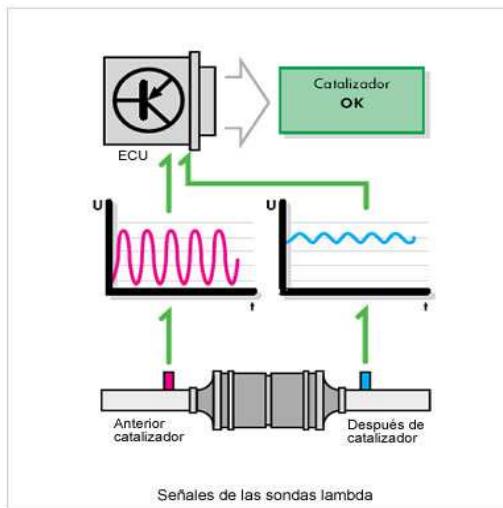


Imagen 154. Señales de las sondas lambda

#### Regulación lambda en la inyección directa de gasolina

El catalizador acumulador de NO<sub>x</sub>, presenta una doble función. Además de la acumulación de NO<sub>x</sub>, y de la oxidación de HC y CO durante el funcionamiento con mezcla pobre, para el funcionamiento con "lambda = 1" es necesaria una función estable de tres vías, que requiere un mínimo de capacidad de acumulación de oxígeno. La sonda lambda delante del catalizador vigila la composición estequiométrica de la mezcla.

Además de su aportación a la regulación con dos sondas, la sonda de dos puntos detrás del catalizador acumulador de NO<sub>x</sub> con el sensor de NO<sub>x</sub> integrado sirve para la vigilancia del comportamiento combinado de acumulación de O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (identificación del fin de la fase de desacumulación de NO<sub>x</sub>).

En la figura inferior tenemos una línea de escape de un motor de inyección directa de gasolina FSi. El sistema de escape está ejecutado en versión de 2 caudales en la zona delantera, para producir un aumento de par a regímenes bajos. Cada uno de los dos ramales de escape posee un precatalizador propio. Los precatalizadores van unidos de forma inseparable con el colector de escape que les corresponde.

Dos sondas de banda ancha ejercen funciones de sondas precatalizador y vigilan la composición de la mezcla. Detrás de los precatalizadores hay dos sondas de dos puntos. Vigilan el efecto de los precatalizadores.

Después de ello los dos ramales de escape confluyen en el catalizador-acumulador de NO<sub>x</sub>. El catalizador-acumulador retiene interinamente los óxidos nítricos (NO<sub>x</sub>) durante el funcionamiento del motor en el modo de mezcla pobre, durante lo cual el sensor NO<sub>x</sub> vigila el grado de saturación y da origen al ciclo de regeneración del catalizador-acumulador.

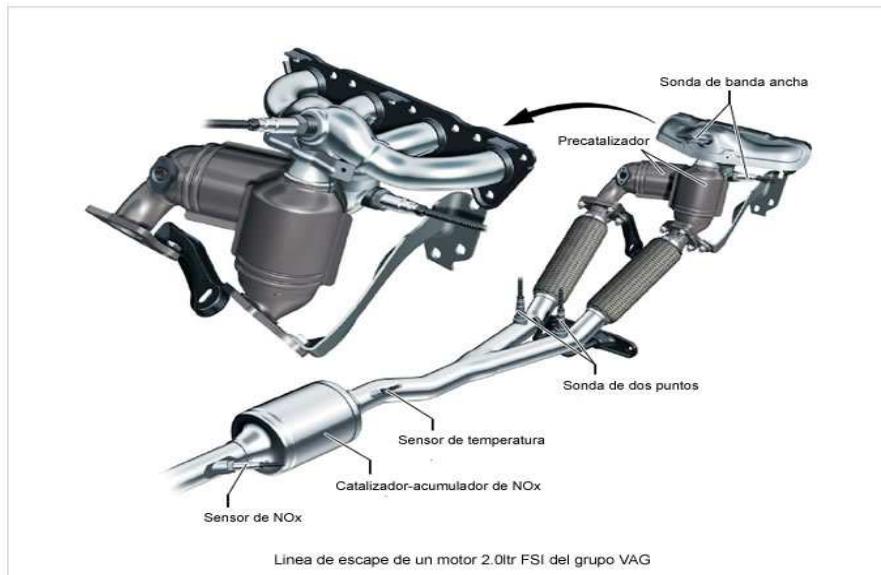


Imagen 155. Línea de escape de un motor FSI de VAG

#### 4.2.5.2.1.6.- Sistema de ventilación positiva del Cárter (PCV)

Durante el funcionamiento del motor, y debido a las presiones y altas temperaturas a que está sometido el aceite del engrase, se produce la oxidación y descomposición del mismo, produciendo vapores que quedan en el interior del cárter. Esta descomposición es más acusada cuando el motor ha perdido compresión, ya que entonces pasan gases frescos de la mezcla durante la compresión y vapores procedentes de la combustión al interior del cárter, que, al condensarse, se mezclan con el aceite descomponiéndolo.

En estas condiciones el aceite pierde rápidamente todas sus propiedades lubricantes, lo que origina el continuo cambio de aceite y ocasiona, además, una pérdida de rendimiento del motor debido a la sobrepresión interna en el interior del cárter.

Para evitar esto, 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.

Entre los procedimientos empleados para ventilar el cárter están:

- Ventilación abierta
- Ventilación cerrada

### La ventilación abierta

Consiste en colocar un tubo, generalmente acoplado a la tapa de balancines (culata), que comunica el interior del cárter con exterior, y a través del cual escapan los gases directamente a la atmósfera, debido a la mayor presión interna de la parte superior del motor y con la ayuda de los órganos en movimiento. Este sistema tiene el inconveniente de que se expulsa a la atmósfera una mezcla de hidrocarburos y gases procedentes de la combustión que contaminan la misma, por lo cual este procedimiento está prohibido desde hace muchos años.

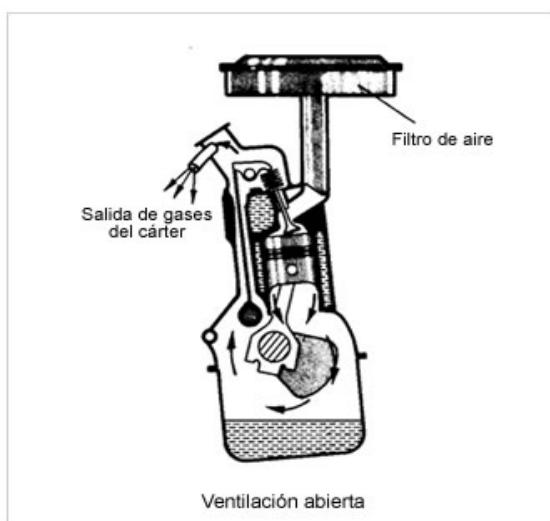


Imagen 156. Sistema de ventilación abierta

### Ventilación cerrada

La ventilación cerrada, que actualmente es obligatoria, consiste en conectar el tubo de salida de gases al colector de admisión, y de esta forma los vapores son devueltos al interior de los cilindros, donde se queman juntamente con la mezcla.

Este sistema tiene la ventaja de que la evacuación y ventilación interior es más rápida, al ser aspirados los gases por los cilindros durante la admisión, y la parte de aceite que arrastra la evacuación, al estar mezclada con los gases en pequeñas proporciones, sirve para el engrase de la parte alta de los cilindros.

Cuando la aspiración de gases se conecta debajo de la mariposa, al llegar al colector de admisión hay una válvula (A) que se cierra a la vez que aquella y el motor queda a ralentí, se evita una entrada de aire y que el motor pueda pararse; esta válvula es accionada por la fuerte depresión ocasionada por el ralentí, cuando se acelera disminuye la depresión y la válvula se abre y continua la ventilación del cárter.

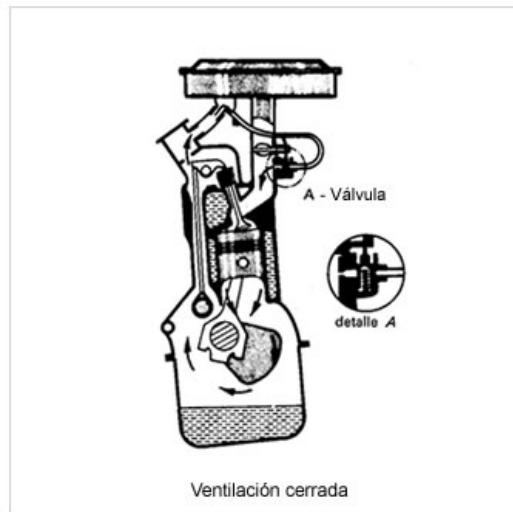


Imagen 157. Sistema de ventilación cerrada

En cierto rango de r.p.m. se abre la válvula PCV, creándose un vacío dentro del motor, que permite la entrada de aire fresco al mismo por medio de unos conductos desde el filtro de aire y la salida de los gases nocivos hacia la cámara de combustión pasando por el múltiple de admisión. El flujo de gases depende exclusivamente de la válvula PCV, y la abertura de este depende del vacío creado en el múltiple de admisión.

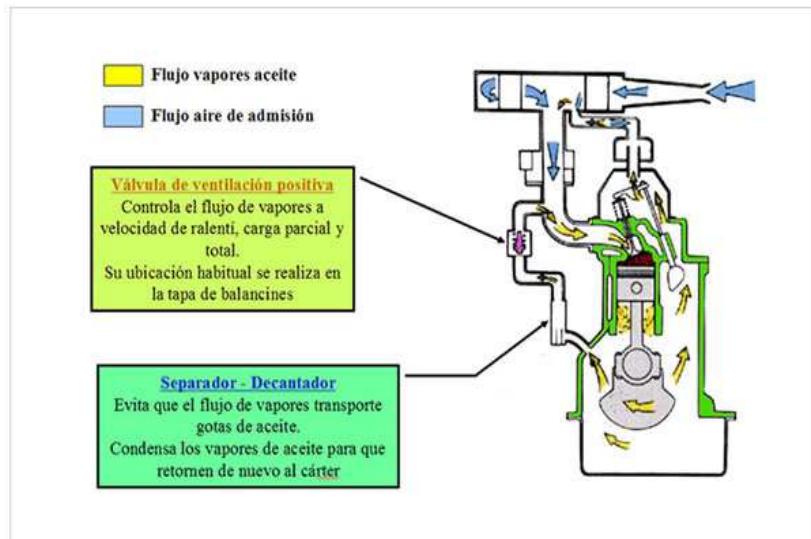


Imagen 158. Sistema PCV

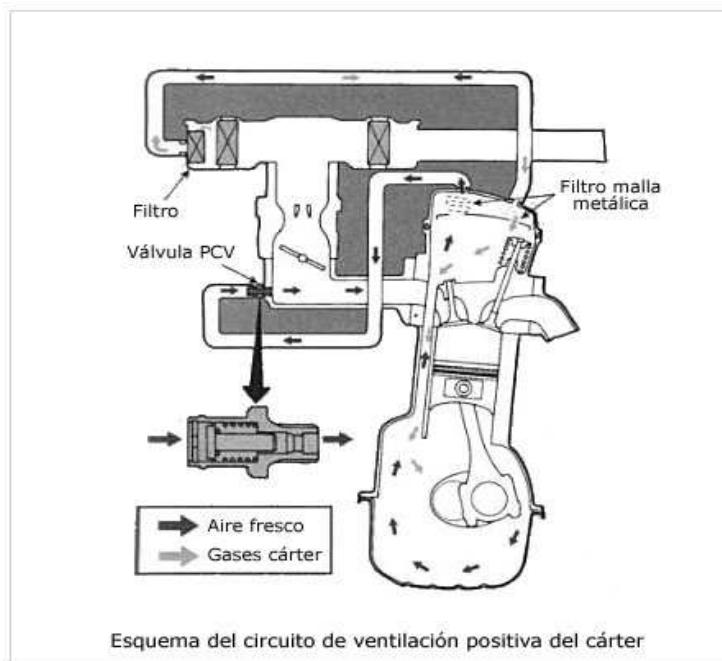


Imagen 159. Esquema del circuito de ventilación positiva

#### 4.2.5.2.1.7.- Válvula de recirculación de los gases de escape EGR (Exhaust gas recirculation)

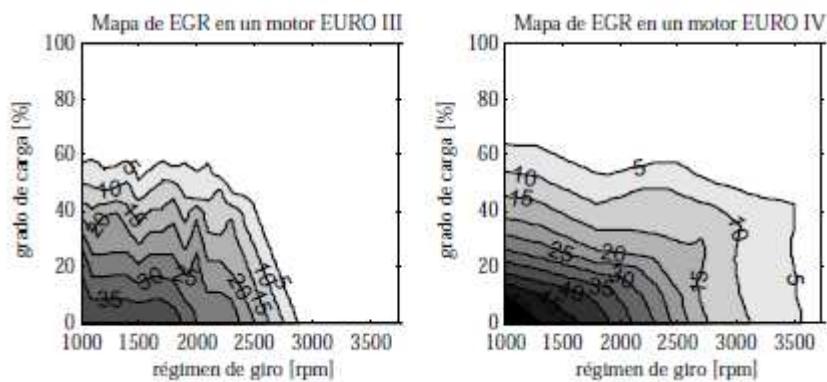
##### **Introducción**

La implantación de normas anticontaminación cada vez más exigentes y la concienciación ecológica de los fabricantes hizo que en los 90 en Europa y bastante antes en USA se empezara a implantar en los motores un dispositivo llamado EGR iniciales de Exhaust Gas Recirculation, que es cómo se conoce la válvula de recirculación de gases de escape.

Actualmente su uso es prácticamente total en los motores Diesel y cada vez mayor en los de gasolina.

Por otro lado la progresiva reducción en los niveles de contaminantes exigidos para cumplir futuras normativas supone un incremento continuo de la importancia del EGR. La tendencia seguida durante los años anteriores lo confirma tal y como se desprende de la Gráfica 21.

En dicha figura se muestra la tasa de EGR en función del régimen de giro y grado de carga para dos motores similares de un mismo fabricante homologados para la normativa euro III y la euro IV es posible notar que mientras en el caso del motor euro III los niveles no superan el 40%, el motor de la euro IV, presenta tasas de egr superiores al 50 %.



Gráfica 21. Comparativas de dos sistemas EGR con legislación EURO III y EURO IV

Cómo ya sabemos, en los gases de escape de los motores Diesel nos encontramos con los siguientes contaminantes:

- Los hidrocarburos (HC).
- El oxido de carbono (CO).
- Las partículas por reacción química de oxidación.
- El oxido de nitrógeno (NOx).

Los tres primeros contaminantes, como se ha comentado en el apartado de catalizadores, se encarga de reducirlos el catalizador de oxidación. El oxido de nitrógeno no se ve afectado por la instalación de un catalizador, a no ser que se instale un catalizador de reducción selectiva, por lo que dicho contaminante hay que tratarlo antes de que llegue al escape. Esta es la razón por la que se utiliza el sistema EGR en los motores.

Para reducir las emisiones de gases de escape, principalmente el óxido de nitrógeno (NOx), se utiliza el sistema EGR que reenvía una parte de los gases de escape al colector de admisión, con ello se consigue que descienda el contenido de oxígeno en el aire de admisión que provoca un descenso en la temperatura de combustión que reduce el óxido de nitrógeno (NOx).

Sin embargo hay que precisar que la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) en los motores Diesel solamente es posible reducirla por este método alrededor de un 50% y para mayores tasas de reducción debe recurrirse a otros sistemas, como el empleo de catalizadores de reducción, como se ha puntualizado anteriormente. En el caso de los motores Diesel disminuye además la formación de partículas de hollín en alrededor de un 10%.

### **Funcionamiento**

Cuando debe activarse el sistema EGR y cual es la cantidad de gases de escape que deben ser enviados al colector de admisión, es calculado por la ECU, teniendo en cuenta:

- El régimen motor (R.P.M.)
- El caudal de combustible inyectado
- El caudal de aire aspirado
- La temperatura del motor
- La presión atmosférica reinante.

Se denomina tasa de egr a la relación entre la masa total admitida por el motor y la cantidad de gas recirculado de acuerdo a la ecuación:

$$EGR = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{EGR}}$$

dónde  $\dot{m}_{EGR}$  representa el gasto másico de EGR y  $\dot{m}_{aire}$  hace referencia al gasto másico de aire fresco.

A la hora de determinar la tasa de EGR de forma experimental cabe decir que, mientras la medida del gasto de aire fresco que atraviesa el motor es factible mediante sensores de hilo caliente, la cantidad de gas recirculado no es en absoluto sencilla de medir. Las elevadas temperaturas del gas recirculado y su contenido en partículas hacen que el uso de sensores de hilo caliente sea inviable.

Si bien durante los últimos años han surgido algunos nuevos métodos para determinar la tasa de EGR, el procedimiento habitual, al menos a escala de laboratorio, para determinarla es utilizar la medida en escape y admisión de la concentración de alguna especie gaseosa afectada por la combustión.

Normalmente el sistema EGR solamente está activado a una carga parcial y temperatura normal del motor, nunca con el motor frío o en aceleraciones.

En la figura inferior se puede ver el esquema básico de un sistema EGR, donde la válvula EGR (5) envía una parte de los gases de escape al colector de admisión, todo ello controlado por la ECU que decide cuando y qué cantidad de gases de escape se hacen recircular.

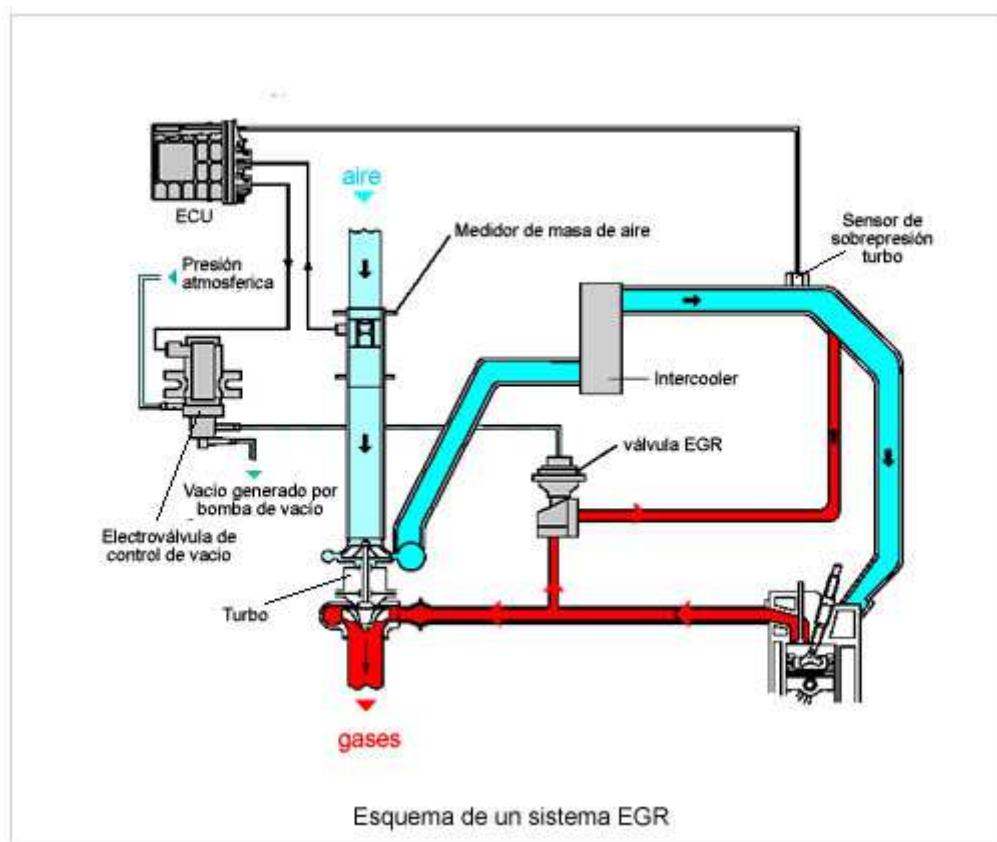


Imagen 160. Esqueuma de un sistema EGR

## Tipos de EGR

A partir de la tasa de egr y el gasto másico de aire fresco es posible determinar la cantidad de gas de escape recirculado.

Existen diversos métodos para reintroducir dicho gas en la admisión.

Según la naturaleza del mismo se puede establecer diversas clasificaciones del sistema de recirculación. Las más importantes se detallan a continuación.

1. Atendiendo al lugar de extracción de los gases a recircular los sistemas de EGR se clasifican en sistemas de EGR interno y sistemas de EGR externo.

**EGR interno:** Esta técnica se basa en el aprovechamiento de los reflujo en las válvulas para atrapar una cierta cantidad de gases residuales en el cilindro. En este sentido el EGR interno tiene la ventaja de su teórica simplicidad constructiva y que no necesita un gradiente de presiones positivo entre escape y admisión para llevar a cabo su cometido.

El EGR interno se produce a partir de un diseño particular de la distribución. Generalmente, un perfil peculiar de las levas de escape permite que estas se reabran durante la carrera de admisión en un punto en que la presión de escape es superior a la del cilindro.

De esta forma parte del gas de escape es devuelto al cilindro. Pese a que se han llevado a cabo diversos estudios que muestran resultados interesantes en cuanto a la reducción de NOx con un sistema relativamente simple y económico, los importantes inconvenientes de este tipo de tecnología han hecho que su uso no haya proliferado.

En efecto, las altas temperaturas del gas recirculado son un inconveniente fundamental, pues reducen de forma notable la masa admitida haciendo necesarias mayores presiones de sobrealimentación. Sin embargo, la mayor dificultad que presentan los sistemas de EGR interno es la reducida o nula capacidad de regulación. No obstante, los nuevos sistemas de distribución variable pueden solventar este problema y el egr interno vuelve a estar de actualidad.

**EGR externo:** En este caso el gas recirculado procede de algún punto del escape del motor. El gas uye por diferencia de presión a través de un conducto que conecta algún punto de la línea de escape con un punto del sistema de admisión.

Esto hace que la elección de los lugares de toma y descarga del gas tenga una importancia fundamental puesto que el salto de presión entre dichos puntos determinaría en gran medida el gasto máximo recirculado.

Adicionalmente, este sistema requiere una válvula para limitar la cantidad de gas que se dirige hacia la admisión.

**2.** En el caso de los sistemas de egr externo se puede realizar otra clasificación atendiendo a los puntos de donde se extrae y se suministra el gas a recircular. Así, existen sistemas de EGR de alta presión (o ruta corta) y sistemas de EGR de baja presión (o ruta larga).

**EGR de alta presión o ruta corta:** Se trata del sistema más usual en motores sobrealimentados. Este método de recirculación consiste en extraer el gas aguas arriba de la turbina y guiarlo hasta después del compresor (o después del intercooler en su caso), de forma que todo el conjunto se encuentra a una presión superior a la atmosférica.

La diferencia de presiones entre los colectores de admisión y escape, junto con la posición de la válvula de recirculación determinará el gasto de gas recirculado.

Debido a las elevadas tasas de EGR requeridas, es posible que en algunos puntos de funcionamiento el salto de presiones entre colectores de admisión y escape no sea suficiente para alcanzar el nivel de EGR solicitado.

En el límite, de acuerdo con la primera ecuación básica de la sobrealimentación es posible que bajo determinadas circunstancias la presión media en el colector de admisión sea superior a la del colector de escape invirtiendo el sentido del ujo y enviando aire fresco directamente al escape.

Afortunadamente este hecho no suele ocurrir en los motores de pequeña cilindrada puesto que el reducido tamaño del turbogrupo hace que los rendimientos de compresor y turbina sean moderados, además en estos motores el egr se realiza en una zona de funcionamiento de baja carga y por tanto con dosados reducidos y bajas temperaturas de escape. No obstante, para evitar reujos y permitir mayores tasas de egr se pueden adoptar soluciones tales como el estrangulamiento de la admisión o el uso de sistemas auxiliares como el venturi, la válvula rotativa o las láminas elásticas.

**EGR de baja presión o ruta larga:** En este sistema el gas de escape que se pretende reintroducir en el motor se extrae aguas abajo de la turbina para llevarlo hasta la entrada del compresor aprovechando la depresión generada por el mismo.

Para evitar daños en el compresor y el intercooler el gas de escape se toma de la salida del filtro de partículas. En este tipo de sistemas no puede aparecer inversión de flujo, pues la presión de escape siempre es mayor o igual a la presión de entrada al compresor.

Sin embargo, la diferencia de presiones entre la extracción y la descarga es generalmente insuficiente para alcanzar los niveles de egr deseados, luego son necesarios sistemas auxiliares como una válvula de contrapresión en el escape o una válvula de estrangulamiento en la admisión.

Cabe decir que algunos autores han propuesto soluciones intermedias tales como extraer el gas de la entrada a la turbina e introducirlo a la entrada del compresor. Estas soluciones intermedias han proliferado con los sistemas de sobrealimentación de doble etapa, así es posible encontrar trabajos que proponen introducir el gas recirculado entre la primera y segunda etapa de compresión.

**3.** Atendiendo a la temperatura del gas, los sistemas de recirculación de gases de escape se pueden clasificar en sistemas de EGR caliente y sistemas de EGR frío.

**EGR caliente:** Se entiende por EGR caliente al que se produce sin ningún tipo de enfriamiento del gas recirculado. En este caso, el EGR tiene un efecto importante sobre la temperatura de admisión puesto que estos gases están mucho más calientes que el aire admitido.

El incremento de la temperatura de admisión es un efecto en general no deseado de la recirculación de gases de escape puesto que contribuye a aumentar las emisiones de NOx. No obstante, en determinadas circunstancias, como el arranque en frío, el incremento en la temperatura de admisión favorece el inicio de la combustión y reduce la dispersión cíclica del motor. Obviamente, los sistemas de EGR interno son también de EGR caliente puesto que no permiten el enfriamiento del gas.

**EGR frío:** En este sistema el gas recirculado se enfriá en un intercambiador de calor para no afectar en la medida de lo posible a la temperatura de admisión. Si bien la disminución de la temperatura de admisión representa una ventaja para las prestaciones del motor, la complejidad del circuito se ve incrementada.

Además es necesario tener en cuenta que un enfriamiento excesivo de los gases de escape puede llevar a la condensación del vapor de agua y otras sustancias contenidas en el mismo.

**4.** Finalmente, pese a que no se trata de una característica del sistema de EGR en sí, sino más bien del modo de gestionarlo, según algunos autores, de acuerdo con la masa total admitida por el motor existen dos tipos de sistemas de recirculación de gases de escape, sistemas de adición y sistemas de sustitución.

**EGR de adición:** En este caso la masa de aire fresco admitida por el motor permanece constante al introducir el EGR.

De esta forma los gases recirculados constituyen una masa adicional. El EGR de adición se lleva a cabo en los mep puesto que los requisitos de post-tratamiento exigen que el motor funcione con dosado estequiométrico. De esta forma, para una determinada cantidad de combustible, la masa de aire que debe admitir un mep está fijada independientemente de la tasa de EGR que se realice.

**EGR de sustitución:** La masa total admitida por el motor se mantiene constante, de modo que el egr admitido desplaza una cierta cantidad de aire fresco que ocupará parte de la cámara de combustión en caso de que el motor operara sin EGR.

Este método de recirculación de gas de escape es el que se lleva a cabo en los mec, puesto que al contrario de lo que ocurre en los mep, los motores Diesel no disponen en general de una válvula de estrangulamiento que regule la cantidad de aire admitido, en este sentido para una presión de admisión dada siempre admiten la misma masa. Por tanto, si no se varía la presión de soplado el egr desplazará parte del aire fresco manteniendo constante la masa admitida por el motor.

#### **Análisis de EGR de alta y baja presión**

El EGR actúa como un gas inerte en el interior del cilindro, inhibiendo las reacciones de formación del NOx que tienen lugar durante el proceso de combustión. Al actuar directamente sobre el origen de las emisiones de NOx hace que el EGR sea una práctica muy efectiva para reducirlos. Sin embargo, también afecta al proceso de combustión de forma desfavorable para otras emisiones, como la emisión de partículas, y sobre las prestaciones del motor aumentando el consumo específico.

Por otra parte, para conseguir el gasto de EGR necesario se han ido desarrollando diferentes arquitecturas del sistema de EGR, que tendrá una influencia directa sobre el proceso de renovación de la carga y afectaran directamente a los componentes de admisión y de escape.

De entre las muchas arquitecturas que se pueden implementar para realizar el EGR, es el EGR de Alta Presión refrigerado el que actualmente se utiliza en todos los vehículos. Este tipo de EGR consiste en la extracción de gas de escape antes de entrar en la turbina, refrigerarlo con agua de motor en un intercambiador agua-gas y mezclarlo con el aire fresco en el colector de admisión después del compresor.

Sin embargo este sistema tiene limitaciones, sobre todo, las que le impiden alcanzar altas tasas de EGR para lograr alcanzar los niveles de emisiones contaminantes de las normativas futuras.

El endurecimiento de las normativas anticontaminación está obligando a que la gestión del EGR sea más precisa. No solo con vistas a reducir más las emisiones de NOx, que es su misión principal, sino también para evitar perjudicar las emisiones de PM y las prestaciones del motor.

Diversos estudios sobre diferentes alternativas al EGR de Alta Presión para alcanzar dichos niveles de emisiones han surgido en los últimos años, entre las que se encuentran las técnicas de post-tratamiento de NOx o el EGR de Baja Presión. Si bien los post-tratamientos son efectivos en la reducción de NOx no es una tecnología muy desarrollada todavía, su entrada en motores comerciales parece cercana.

Por otro lado aparece el EGR de Baja Presión, una técnica que hace unos años fue descartada por cuestiones de durabilidad de componentes ya que el gas de escape (sucio de partículas) tenía que atravesar el compresor y el intercambiador del motor. La extensiva introducción de los filtros de partículas en la línea de escape de los motores diesel sobrealimentados, hace que el gas de escape ya no sea un peligro para estos componentes y el EGR de Baja Presión vuelve a ser una alternativa.

Con él se logran alcanzar altas tasas de EGR y mejoran las emisiones de PM y el comportamiento motor. Sin embargo, la condensación del vapor del agua del EGR debido a la refrigeración y la necesidad de instalar una restricción en la admisión o en el escape que garantice el salto de presión necesario para que exista el gasto de EGR deseado, son las principales limitaciones de esta arquitectura.

Como se ha comentado anteriormente la aplicación de sistemas de post-tratamiento de NOx es efectivo, pero parten de aplicar cierta tasa de EGR. Por otra parte, los motores con nuevos modos de combustión requieren de altas tasas de EGR y alta capacidad de control para su desarrollo.

Si además se tiene en cuenta que hoy por hoy el EGR es el único medio para reducir NOx, se justifica la continuidad de los estudios de EGR. El estudio que aquí se presenta, está encaminado a mejorar las emisiones de NOx y reducir la influencia en las prestaciones del motor mediante la combinación de los sistemas de EGR de alta y baja presión, de forma que se aprovechen sus ventajas individuales.

Entre las conclusiones obtenidas cabe destacar dos de ellas, de forma muy resumida y general. Por un lado la de que es posible utilizar ambos sistemas de forma conjunta y que las mayores tasas de EGR se dan con ambos sistemas trabajando conjuntamente, como se ve en la figura. Por otro lado, se obtiene una zona de funcionamiento conjunto, descrita en la figura, en la que se optimizan las emisiones de NOx y PM.

Las conclusiones básicas obtenidas son las siguientes:

**1-** El sistema de EGR de Alta Presión utilizado en actualidad tiene limitada su capacidad de alcanzar grandes tasas de EGR, entre otros motivos, debido a la alta temperatura de admisión.

Además, las altas tasas de EGR alcanzadas con el sistema de alta presión tienen un efecto indeseado sobre las emisiones de PM y sobre las prestaciones del motor.

**2-** Los sistemas de EGR de Baja Presión logran mayores tasas de EGR que los de Alta Presión.

Además los efectos sobre las emisiones de PM y sobre las prestaciones del motor aparecen con tasas mayores.

Sin embargo, las altas tasas de EGR de Baja Presión son alcanzadas introduciendo una restricción en la línea de escape o de admisión que garantice el salto de presión suficiente entre ambas líneas para que haya el gasto necesario de EGR.

Además, en algunos puntos de funcionamiento del motor, los altos niveles de refrigeración de EGR de Baja Presión dan lugar a condensaciones del vapor de agua generalmente de carácter ácido.

**3-** La combinación de ambos sistemas permite alcanzar mayores tasas de EGR que de forma individual, si no usamos restricción para realizar el EGR de baja presión. Además se puede definir una zona de trabajo de forma que se puedan utilizar las ventajas de ambos sistemas en circunstancias específicas. Garantizando los niveles de emisiones de NOx y PM, así como las prestaciones del motor.

### **Válvulas EGR**

La válvula EGR dosifica el caudal de gases de escape reciclados. El sistema está instalado en el colector de gases de escape o en el sector de aspiración o también puede ir ubicado en un tubo termoresistente que conecta el colector de escape con el colector de admisión.

Las válvulas EGR pueden ser neumáticas o eléctricas:

**Las válvulas neumáticas EGR** se activan mediante vacío a través de las válvulas electromagnéticas (electroválvulas). En los sistemas sencillos que utilizan electroválvulas para la activación (EUV), la válvula EGR cumple solamente la función de abrir o cerrar. El vacío es captado en el tubo de aspiración o generado por una bomba de vacío.

Las válvulas EGR neumáticas son accionadas por depresión o vacío. Están constituidas por una membrana empujada por un muelle, que abre o cierra una válvula a través de una varilla hueca en cuyo extremo lleva un punzón. La varilla está acoplada a la membrana, que se mueve abriendo la válvula cada vez que la depresión actúa sobre la membrana y vence la presión del muelle.

Para controlar la depresión que actúa sobre la válvula EGR necesitamos de otra válvula separada en este caso eléctrica que será controlada por la ECU.

La electroválvula transforma las señales de la unidad de control para sistema de inyección directa en una presión de control. A esos efectos se alimenta con vacío del motor, el cual lo conduce hacia la válvula EGR al recibir la señal correspondiente por parte de la unidad de control. La proporción de período de la señal de control viene a determinar la magnitud del índice de recirculación de gases de escape.

Si se avería la electroválvula se desactiva la recirculación de gases de escape.



Imagen 161. Sección de una válvula EGR neumática

Hay otros sistemas EGR en los que la Válvula EGR y la electrovalvula que controla la depresión o vacío (Convertidor EGR) van juntas es decir forman la misma pieza por lo que se simplifica el sistema como se ve en la figura inferior:

**Las válvulas EGR eléctricas o electromagnéticas** están controladas directamente por el instrumento de mando (son autónomas) y ya no necesitan más el vacío ni las válvulas soleinoides.

Las válvula EGR eléctricas se caracterizan por no tener que utilizar una bomba de vacío para su funcionamiento por lo que trabajan de forma autónoma. Estas válvulas actúan de una forma muy similar al dispositivo "variador de avance de inyección" que utilizan las "bombas electrónicas" que alimentan a los motores de inyección directa diesel (TDi). Constan de un selenoide que actúa al recibir señales eléctricas de la ECU cerrando o abriendo un paso por el que recirculan los gases de escape. El mayor o menor volumen de gases a recircular viene determinada por la ECU, que tiene en cuenta ciertos parámetros como: la velocidad del coche, la carga y la temperatura del motor.

La válvula EGR eléctrica cuenta con un pequeño sensor de posición (1) en su interior que informa a la ECU en todo momento, la posición que ocupa el elemento que abre o cierra el paso de la recirculación de los gases de escape. Este tipo de electroválvula no se resiente de la depresión, por tanto puede abrirse con cualquier carga motor y con cualquier depresión en el colector. Interviene con temperatura líquido motor 55°C, temperatura aire aspirado > 17 °C y régimen motor incluido entre 1500 y .5600 (según las características del motor).

Para la compensación de la presión en la válvula durante las fases de regulación existe una comunicación directa (6) hacia la presión del aire del entorno a través del filtro de aire.

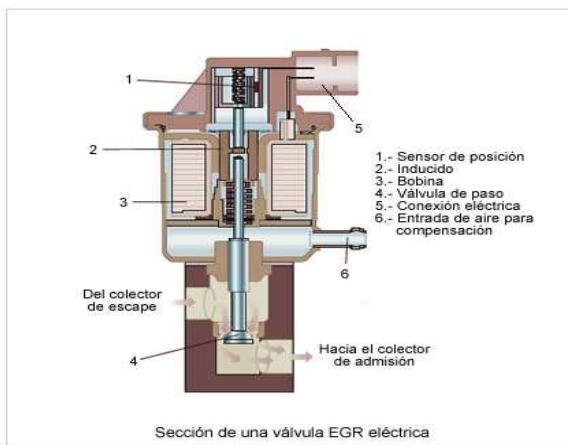


Imagen 162. Sección de una válvula EGR eléctrica

Durante la intervención del sistema EGR, los gases de escape "B" son interceptados y canalizados a través del conducto "C" hacia la válvula "D", que gobernada por la centralita, levanta la válvula "E" permitiendo que los gases de escape sean canalizados hacia la admisión a través del conducto "F".

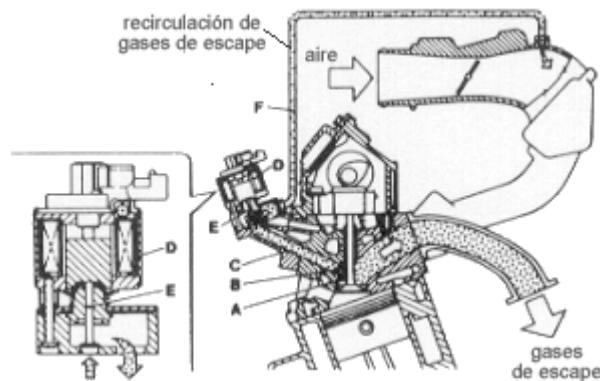


Imagen 163. Funcionamiento de una válvula EGR



Imagen 164. Válvula EGR eléctrica desarrollada por Delphi Automotive.

### Diferencias entre válvulas EGR en Diesel y gasolina

Las válvulas EGR de los vehículos Diesel (figura inferior) tienen grandes diámetros de apertura debido a las elevadas tasas de reciclaje.



Imagen 165. Tipos de válvulas EGR Diesel

Las secciones transversales en las válvulas EGR en los motores de gasolina (figura inferior) son mucho más pequeñas.



Imagen 166. Tipos de válvulas EGR para motores gasolina

### Ejemplo de un sistema EGR en un motor TDi 1.9ltr

Cómo ya se comentado, el sistema de inyección directa Diesel trabaja con altas temperaturas de la combustión y grandes contenidos de oxígeno, que promueven la producción de óxidos nítricos (NOx). Los óxidos nítricos generados no se pueden reducir con el catalizador de oxidación, en virtud de lo cual ya se los tiene que limitar desde el momento de su generación, a base de aplicar una recirculación de gases de escape (EGR).

Introduciendo una determinada cantidad de gases de escape en la mezcla de combustible y aire se reduce la temperatura de la combustión, bajando así el contenido de oxígeno en la cámara y reduciéndose las emisiones de NOx.

Agregando gases de escape, de forma regulada, se puede influir así sobre el comportamiento de las emisiones de escape en función de las condiciones de carga. Sin embargo, el ascenso de la concentración de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y partículas sólidas marca los límites para la cantidad de gases de escape recirculables.

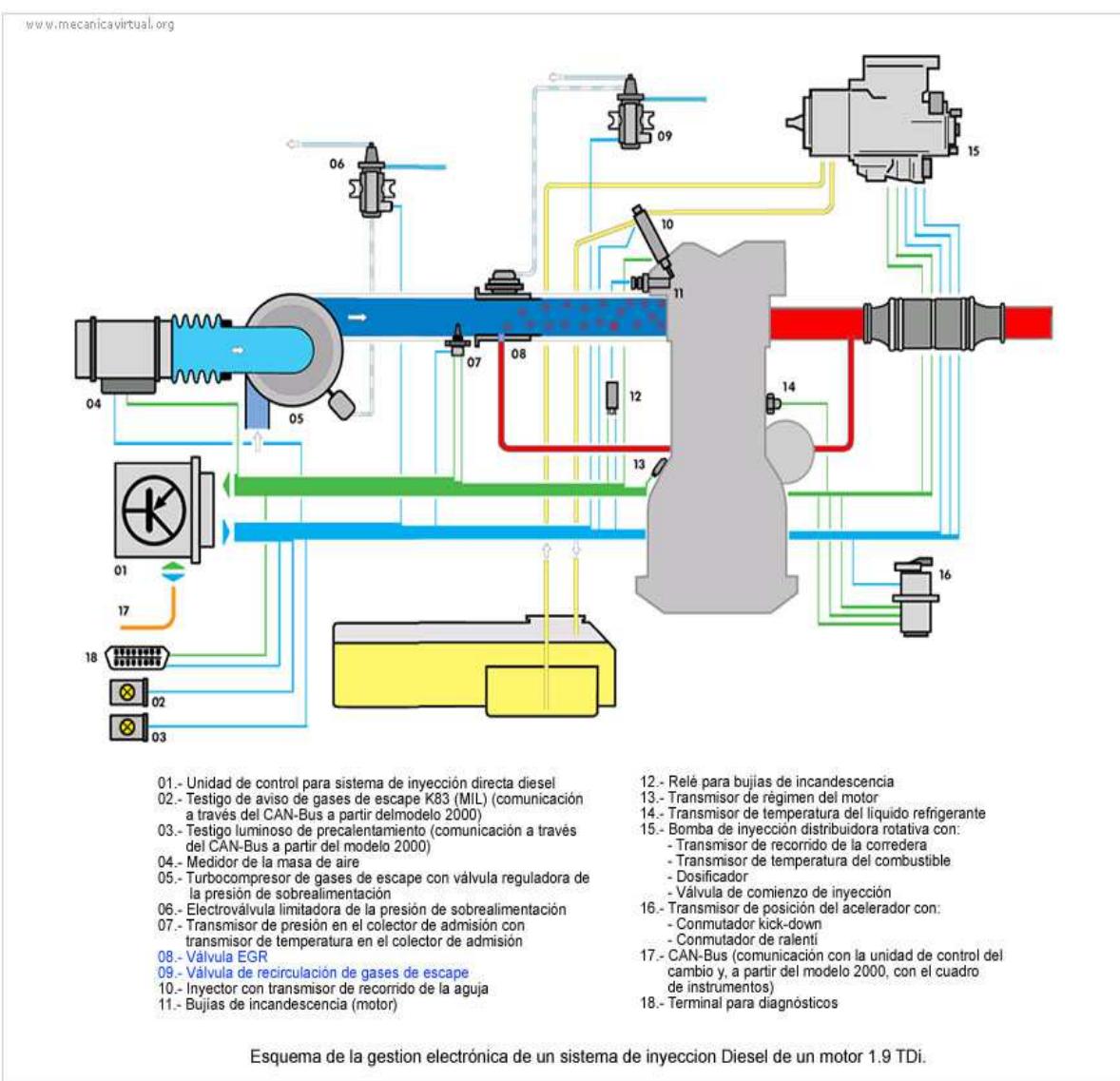


Imagen 167. Esquema de gestión de la gestión electrónica de un Diesel donde se puede observar la función del EGR

La unidad de control para sistema de inyección directa diesel (EDC 15V) comprueba el funcionamiento de la recirculación de los gases de escape, con ayuda del medidor de la masa de aire. El paso de la masa de aire se vigila al momento de un ciclo de recirculación de gases de escape y se compara con los valores teóricos en la unidad de control, en consideración de la señal procedente del transmisor de altitud.

El principio básico del control de funcionamiento está basado en la particularidad, de que, durante un ciclo de recirculación de gases de escape, el flujo de la masa de aire (aire atmosférico) debe ser inferior al flujo que existe al estar desactivada la recirculación de gases de escape.

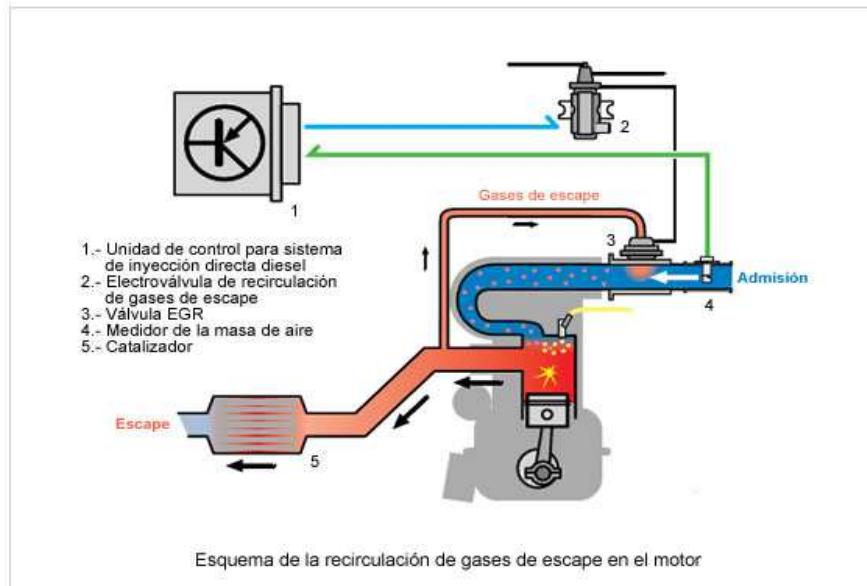


Imagen 168. Esquema de la recirculación de gases de escape

### Sistema EGR refrigerado

Un radiador para recirculación de gases de escape se encarga de que se reduzca aún más la temperatura de la combustión a base de refrigerar los gases de escape que se realimentan y posibilita la recirculación de una mayor cantidad de gases de escape. Este efecto se intensifica con la recirculación de gases de escape a baja temperatura.

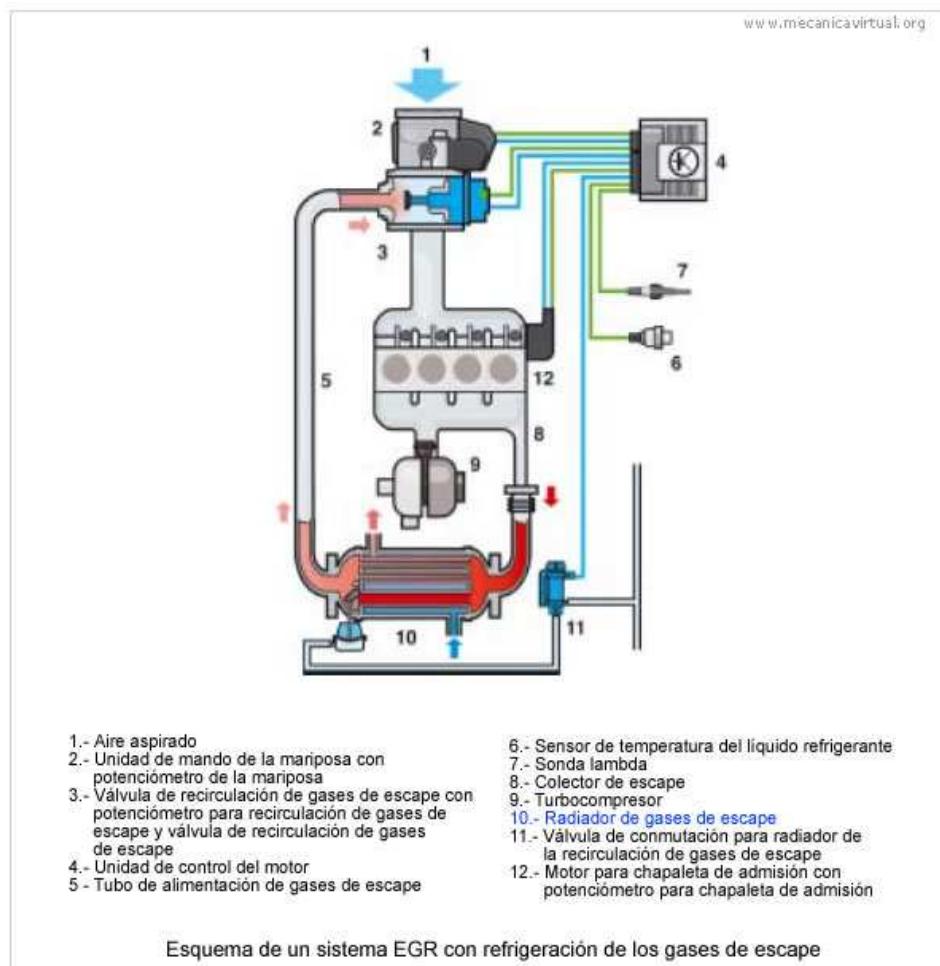


Imagen 169. Esquema de un sistema EGR con refrigeración de los gases de escape

Al estar cerrado el termostato, el radiador para recirculación de gases de escape (Imagen 170) es alimentado directamente con líquido refrigerante frío procedente del radiador del motor. El mayor gradiente de temperatura que ello supone permite recircular una mayor cantidad de gases de escape. De esa forma pueden reducirse las temperaturas de la combustión y, por consecuencia, las emisiones de óxidos nítricos en la fase de calentamiento del motor.

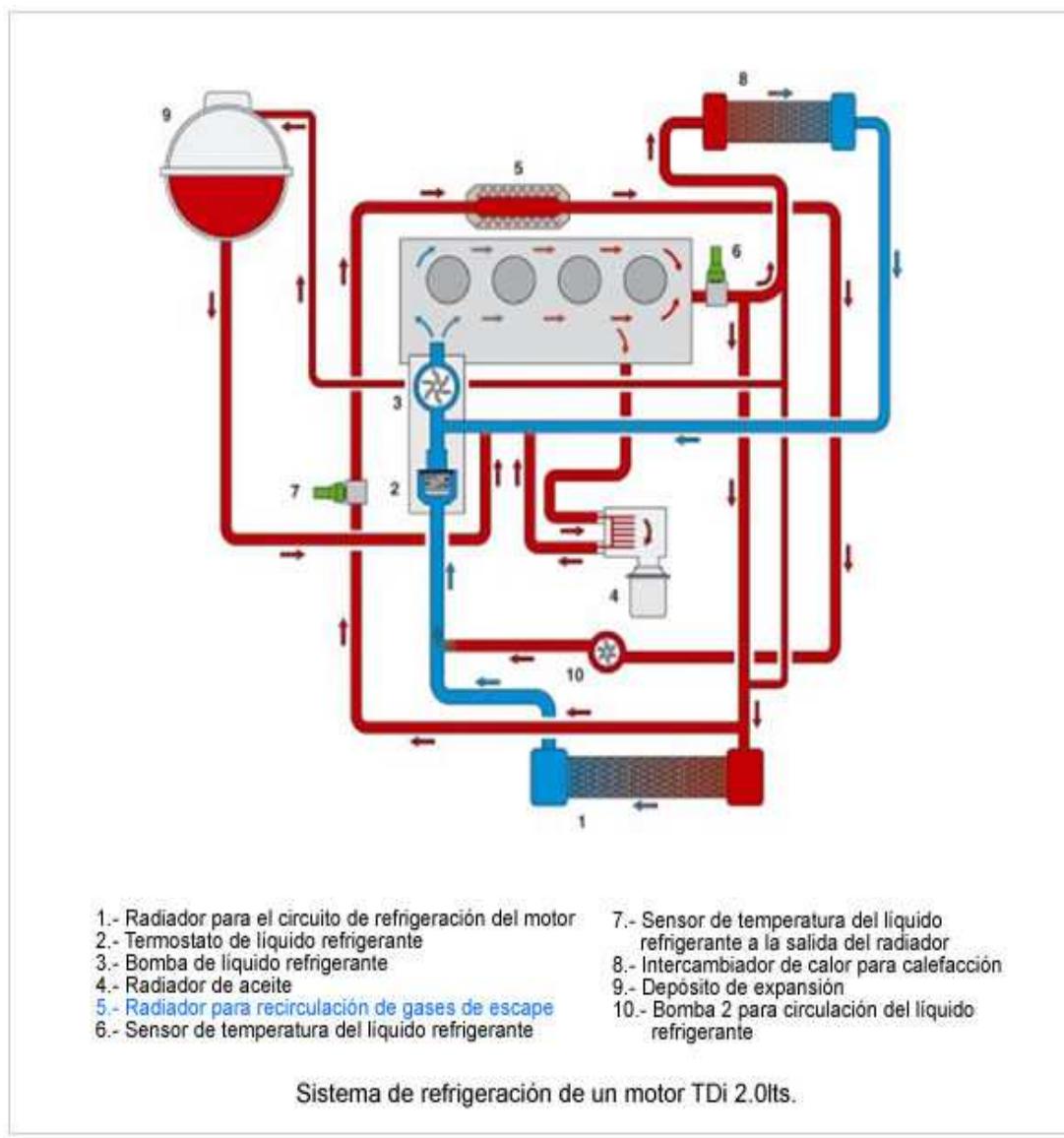


Imagen 170. Sistema de refrigeración de un motor TDI donde se puede observar la parte perteneciente a la refrigeración del EGR

### Averías más comunes

La causa más frecuente de las averías en el sistema EGR son las válvulas EGR adheridas o carbonizadas. Los gases de escape reciclados contienen también partículas de hollín además de los contaminantes gaseosos sobre todo en los automóviles Diesel.

El aceite en el aire de aspiración puede causar las carbonizaciones o las adhesiones contra las cuales la fuerza ejercida por la válvula dejará de funcionar en cualquier momento, la válvula EGR no podrá entonces abrirse o permanecerá abierta. Las consecuencias: sacudidas, ralentí brusco o potencia deficiente.



Imagen 171. Carbonilla acumulada en la válvula EGR

#### **4.2.5.2.1.8.-Canister ó Filtro de carbón activo**

A este sistema, sobre todo los americanos, lo denominan: EVAP (Sistema de control evaporativo de gases). Hay que comentar que el uso de este sistema fue inicialmente implementado a motores con carburador, por ello y a modo de puntualización, en este estudio se comenta el funcionamiento o aplicación a vehículos ya en desuso con carburador, más adelante se analiza en vehículos actuales.

La gasolina por ser muy volátil es inflamable y, además, se evapora a temperatura ambiente con relativa facilidad. Por lo tanto una cantidad relativamente importante de hidrocarburos se escapan del vehículo por evaporación a través de el orificio de ventilación o puesta en atmósfera del tapón de llenado del depósito de gasolina.

También se evaporan hidrocarburos por el aireador de la cuba del carburador, que esta abierto cuando el acelerador esta en posición de reposo.

Se calculó que el combustible que se evaporaba representaba hasta el 20% de la contaminación potencial de un vehículo. En Estados Unidos a partir de 1971 la ley federal exigió el uso de sistemas de control de emisiones evaporativas en la mayoría de los vehículos. Estas fugas de hidrocarburos hacia la atmósfera pueden evitarse recuperando y almacenando momentáneamente en un recipiente llamado canister, para mas tarde quemarlos en el motor.

#### **El canister en motores con carburador**

El canister contiene carbón activo con el fin de retener provisionalmente los hidrocarburos evaporados del depósito de gasolina y de la cuba del carburador.

La válvula de control (8) establece o interrumpe la aspiración de los hidrocarburos por el motor.

Un filtro impide la entrada de polvo que podría ser arrastrado por la circulación de aire que atraviesa el "bote" (canister), cuando se establece la unión colector de admisión con este.

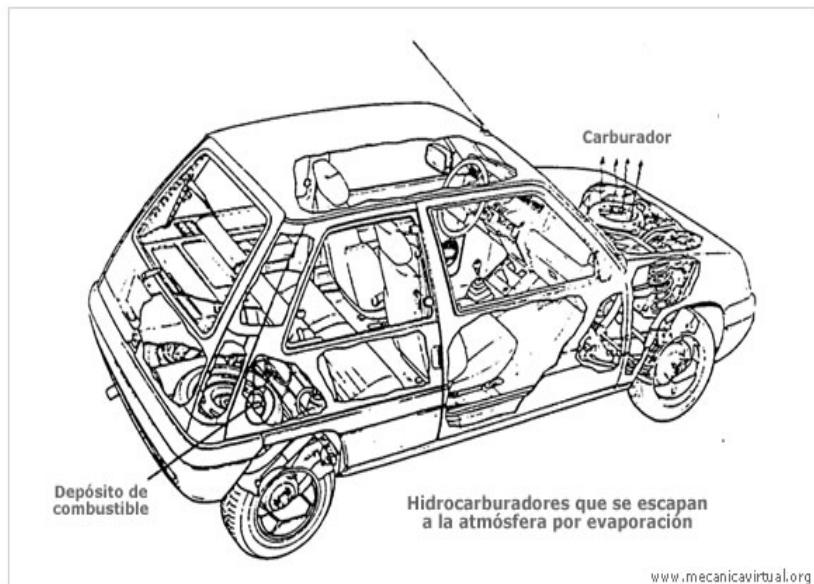


Imagen 172. Representación de la evaporación de los gases de hidrocarburos en un vehículo antiguo

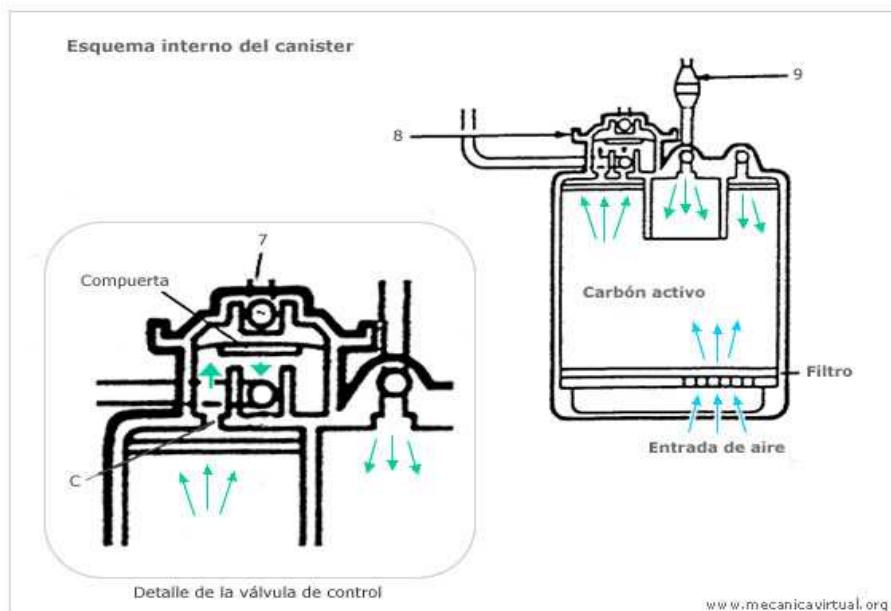


Imagen 173. Esquema interno del canister

## Funcionamiento

Se diferencian dos fases de funcionamiento:

- Vehículo parado
- Vehículo en marcha

### Funcionamiento a motor parado

Los vapores de hidrocarburos acumulados en la parte superior del depósito de gasolina se evacuan hacia el canister a través de la válvula antivuelco (3) y por el tubo (4) y llegan a la válvula de dos vías (9).

Si la presión de los vapores es suficiente una de las compuertas de la válvula (9) se abre, los vapores penetran en el canister (2), el carbón activo retiene los vapores.

Las evaporaciones de la cuba del carburador están canalizadas por el tubo (5) hasta el canister (2).

### Funcionamiento en marcha, mariposa de gases abierta (acelerador)

La depresión canalizada por el tubo (7) actúa en la parte alta de la válvula de control (8), la válvula se abre. La depresión del colector de admisión crea una circulación de aire que atraviesa el carbón activo del canister; los hidrocarburos arrastrados por el aire pasan por el orificio calibrado (C), por la válvula de control (8) al tubo (6); en el colector de admisión se mezclan con el gas aspirado por el motor.

El carbón activo se purga y queda listo para recibir nuevos vapores de gasolina.

Desde el momento que la mariposa vuelve a la posición de ralentí, se interrumpe la acción de depresión de mando, el resorte cierra la compuerta de la válvula de control (8), el motor no aspira del canister, lo que evita el enriquecimiento de la mezcla que alimenta el motor a ralentí o una toma de aire.

A régimen de ralentí las evaporaciones son retenidas en el canister.

Cuando por consumo de carburante o por enfriamiento de éste la presión disminuye en el depósito, bajo el efecto de la presión atmosférica la segunda compuerta de la válvula (9) se abre, la presión se restablece en el depósito de combustible.

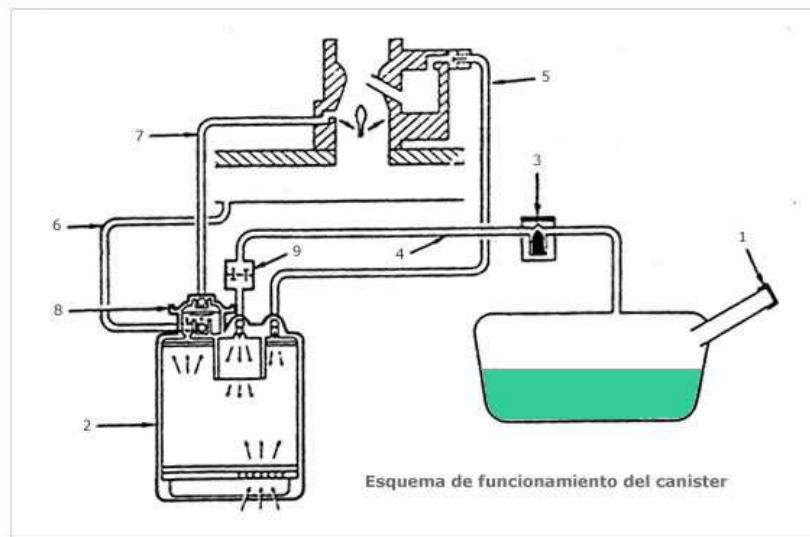


Imagen 174. Esquema de funcionamiento del canister

### El canister actualmente

Con la llegada de la electrónica al automóvil los sistemas de control evaporativo de gases (canister) cambiaron la forma de controlar la purga de los vapores de combustible retenidos en el "bote". Por esta razón ahora la válvula de control de purga esta controlada por electroválvulas que aseguran que los vapores se purgen cuando el motor los puede quemar con más eficiencia. En los modelos más modernos, los que se usan desde hace unos años hasta hoy en día, la gestión del canister es controlada por la centralita de inyección ECU. La centralita actúa sobre una electroválvula que controla la válvula de control de purga, teniendo en cuenta varios factores de funcionamiento del motor como son:

- Temperatura del motor (no funciona hasta que el motor alcanza una determinada temperatura)
- Revoluciones del motor (en ralentí no funciona)
- Carga del motor (con mariposa totalmente no funciona)
- Arranque (durante el arranque no funcionaria)

La purga del canister aumenta hasta que la centralita recibe una señal de una condición rica de combustible desde la sonda lambda, después la purga es controlada hasta que la señal de la sonda lambda nos da una señal de mezcla correcta.

En la figura inferior se ve un sistema de control evaporativo de gases (canister) aplicado a un motor de inyección electrónica de gasolina. Una válvula de control de diafragma montada en la parte superior del bote (1) se mantiene abierta durante la marcha del motor con la depresión de admisión, por vía de un tubo procedente del cuerpo de mariposa. La electroválvula (3) es la encargada de abrir o cerrar el paso de los gases de purga del canister hacia el colector de admisión del motor.

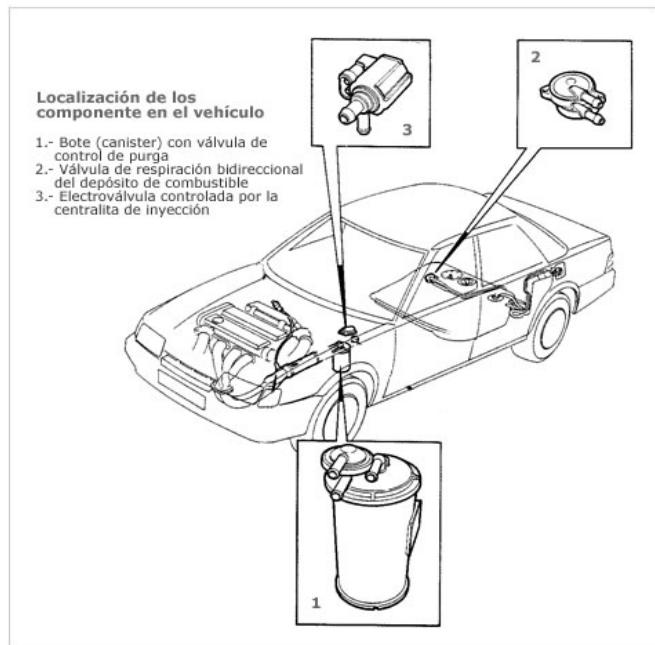


Imagen 175. Localización del canister en el vehículo

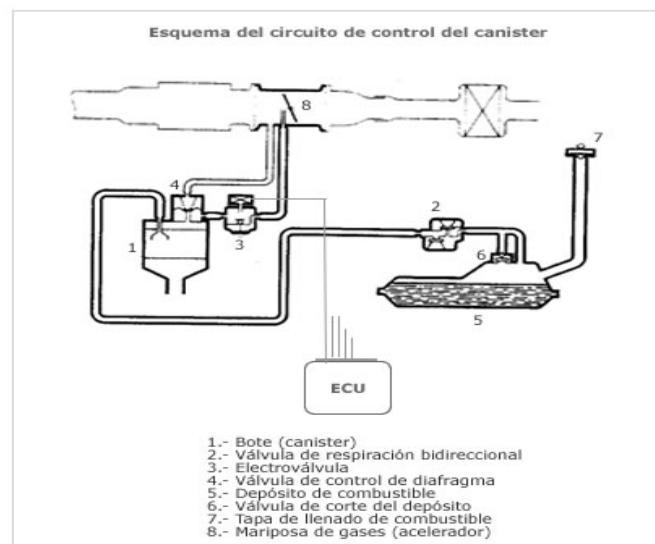


Imagen 176. Circuito de control del canister

Para impedir que el combustible líquido pase del depósito al tubo, el sistema lleva incorporado una válvula de cierre de combustible (6). Hay tapas de llenado (7) que llevan incorporado unas válvulas para aliviar tanto la presión como el vacío que se pueda crear en el depósito de combustible. En condiciones normales estas válvulas están cerradas para garantizar la estanqueidad. En caso de fallo del sistema y la presión o depresión fuese excesiva, se abrirá una de las válvulas de la tapa de llenado para descargar este exceso de presión o vacío a la atmósfera.

En los sistemas de gestión electrónica mas modernos (figura inferior) se suprime hasta la "válvula de control" (posición 4 en el esquema anterior). Con la electroválvula (12) se puede controlar en todo momento la purga de los gases del canister, según lo decida la unidad de control ECU (12).

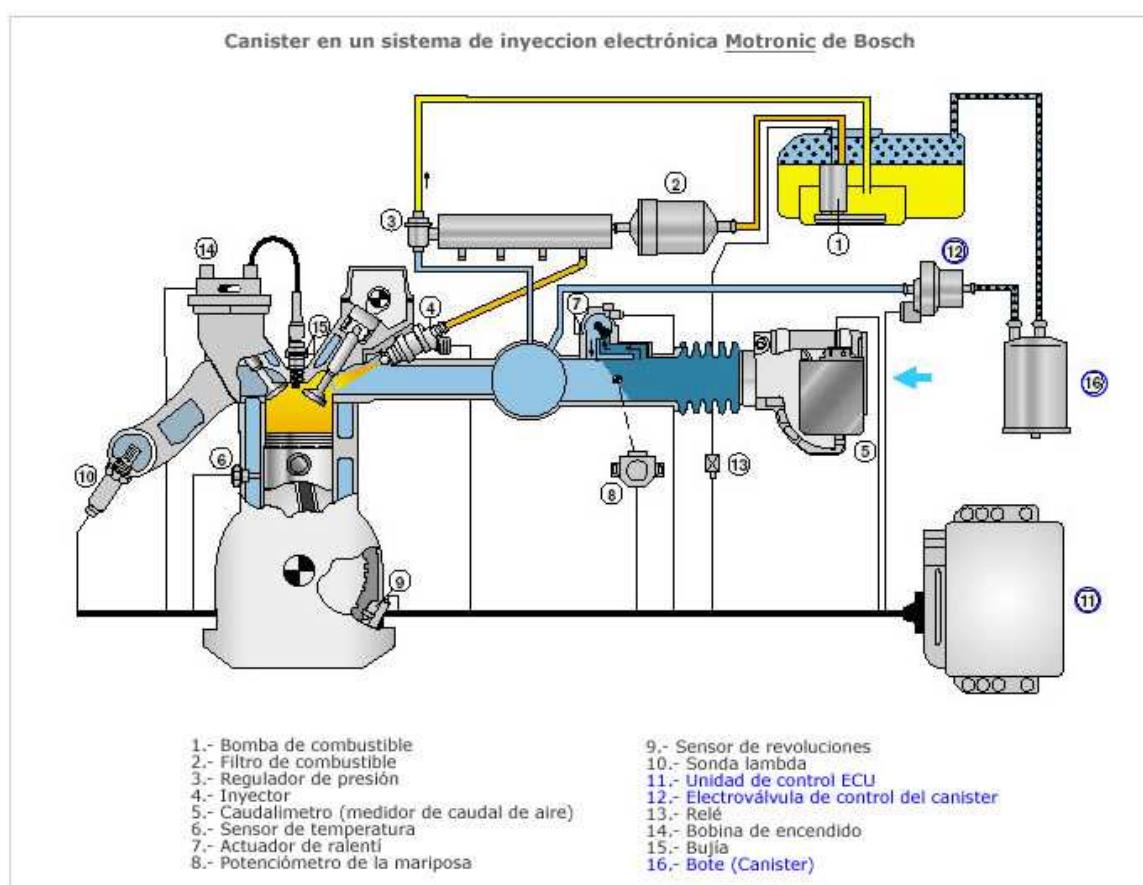


Imagen 177. Canister en un sistema de inyección electrónica Motronic de Bosch

#### **4.2.5.2.1.9.-Sistemas de control del post-tratamiento**

Todos los motores actualmente y cómo ya se sabe cuentan con un control puramente electrónico. Mediante mediciones a través de sondas colocadas estratégicamente en el motor la ECU puede analizar los patrones de funcionamiento y optimizar los procesos.

En este apartado del proyecto se va a proceder a comentar de manera breve, uno de los sistemas más notorios en motores de combustión.

#### **OBD [89]**

OBD (On Board Diagnostics) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (coches y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un monitoreo y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo. Los vehículos pesados poseen una norma diferente, regulada por la SAE, conocida como J1939.

OBD II es la abreviatura de On Board Diagnostics (Diagnóstico de a bordo) II, la segunda generación de los requerimientos del equipamiento autodiagnosticable de a bordo de los Estados Unidos. La denominación de este sistema se desprende de que el mismo incorpora dos sensores de oxígeno (sonda Lambda), uno ubicado antes del catalizador y otro después del mismo, pudiendo así comprobarse el correcto funcionamiento del catalizador. Las características de autodiagnóstico a bordo están incorporadas en el hardware y el software de la computadora de abordo de un vehículo para monitorear prácticamente todos los componentes que pueden afectar las emisiones.

Cada componente es monitoreado por una rutina de diagnóstico para verificar si está funcionando perfectamente. Si se detecta un problema o una falla, el sistema de OBD II ilumina una lámpara de advertencia en el cuadro de instrumentos para avisarle al conductor. La lámpara de advertencia normalmente lleva la inscripción "Check Engine" o "Service Engine Soon".

El sistema también guarda información importante sobre la falla detectada para que un mecánico pueda encontrar y resolver el problema. En los Estados Unidos, todos los vehículos de pasajeros y los camiones de gasolina y combustibles alternativos desde 1996 deben contar con sistemas de OBD II, al igual que todos los vehículos de pasajeros y camiones de diésel a partir de 1997.

Además, un pequeño número de vehículos de gas fueron equipados con sistemas de OBD II. Para verificar si un vehículo está equipado con OBD II, se puede buscar el término "OBD II" en la etiqueta de control de emisiones en el lado de abajo de la tapa del motor, además el obd se limita en obd III que es via satelite.

### OBD I

OBD I fue la primera regulación de OBD que obligaba a los productores a instalar un sistema de monitoreo de algunos de los componentes controladores de emisiones en automóviles. Obligatorios en todos los vehículos a partir de 1991, los sistemas de OBD I no eran tan efectivos porque solamente monitoreaban algunos de los componentes relacionados con las emisiones, y no eran calibrados para un nivel específico de emisiones.

### EOBD

EOBD es la abreviatura de European On Board Diagnostics (Diagnóstico de a Bordo Europeo), la variación europea de OBD II. Una de las diferencias es que no se monitorean las evaporaciones del tanque de combustible. Sin embargo, EOBD es un sistema mucho más sofisticado que OBD II ya que usa "mapas" de las entradas a los sensores basados en las condiciones de operación del motor, y los componentes se adaptan al sistema calibrándose empíricamente. Esto significa que los repuestos necesitan ser de alta calidad y específicos para el vehículo y modelo.

### **Historia del OBD**

Para reducir la contaminación del aire, el "California Air Resources Board" (\*CARB)[89] 1988 introdujo para todos los coches a gasolina con el OBD (On Board Diagnose) límites máximos de emisiones y además un autocontrol - On Board Diagnose de componentes relevantes de las emisiones de gas a través de dispositivos de mando electrónicos. Para que el conductor detecte un mal funcionamiento del OBD se impuso la obligación de tener una lámpara que indique fallos (MIL - Malfunktion Indicator Lamp).

Un recrudecimiento en los límites de emisiones en 1996 llevó a la creación del OBD II. En Europa se introdujo el OBD ajustándose al OBD II americano. Desde 1996 el OBD II es un requisito legal para coches nuevos en USA. En base a esta regla americana se impuso en los noventa la inclusión de sistemas de diagnóstico también para los coches destinados al mercado europeo.

En Europa, según la Directiva 98/69EG [90], los coches a gasolina de 2000 en adelante, los coches a diesel de 2003 en adelante y los camiones desde 2005 en adelante tienen que estar provistos de un OBD. El estandarizado interfaz del OBD2 no sólamente es utilizado por el fabricante para sus funciones avanzadas de diagnóstico sino también por aquellos que van más allá de lo que la ley exige.

La siguiente etapa planeada es el OBD III en el que los propios coches toman contacto con las autoridades si se produce un empeoramiento de las emisiones de gases nocivos mientras el coche está en marcha. Si esto sucede se pedirá, a través de una tarjeta indicativa, que se corrijan los defectos.

### **Control en motores Diesel y gasolina**

#### Control en los motores de gasolina

- Vigilancia del rendimiento del catalizador
- Diagnóstico de envejecimiento de sondas lambda
- Prueba de tensión de sondas lambda
- Sistema de aire secundario ( si el vehículo lo incorpora)
- Sistema de recuperación de vapores de combustible (cánister)
- Prueba de diagnóstico de fugas
- Sistema de alimentación de combustible
- Fallos de la combustión - Funcionamiento del sistema de comunicación entre unidades de mando, por ejemplo el Can-Bus
- Control del sistema de gestión electrónica
- Sensores y actuadores del sistema electrónico que intervienen en la gestión del motor o están relacionados con las emisiones de escape

#### Control en los motores Diesel

- Fallos de la combustión
- Regulación del comienzo de la inyección
- Regulación de la presión de sobrealimentación
- Recirculación de gases de escape
- Funcionamiento del sistema de comunicación entre unidades de mando, por ejemplo el Can-Bus
- Control del sistema de gestión electrónica
- Sensores y actuadores del sistema electrónico que intervienen en la gestión del motor o están relacionados con las emisiones de escape

El OBD permite estandarizar los códigos de averías para todos los fabricantes y posibilitar el acceso a la información del sistema con equipos de diagnosis universales. Proporciona información sobre las condiciones operativas en las que se detectó y define el momento y la forma en que se debe visualizar un fallo relacionado con los gases de escape.

Los modos de prueba de diagnóstico OBDII han sido creados de forma que sean comunes a todos los vehículos de distintos fabricantes. De esta forma es indistinto tanto el vehículo que se esté chequeando como el equipo de diagnosis que se emplee, las pruebas se realizarán siempre de la misma forma.

## **4.2.6. -Evolución de las técnicas de sobrealimentación**

La sobrealimentación consiste en aumentar la masa de aire (diésel) o de mezcla aire/gasolina (motor de gasolina) que entra al cilindro en la fase de admisión, aumentando su presión en el motor de combustión interna alternativo, para aumentar la fuerza de la carrera de trabajo, es decir el par motor en cada revolución y por tanto la potencia. Los sistemas de sobrealimentación se inventaron a principios del siglo XX, pero en su momento solo apareció un uso práctico en los motores de aviación, con objeto de poder compensar la pérdida de densidad del aire con la altura.

La presión que ejerce un sobrealimentador se mide en bar o en lb/pulgada cuadrada (psi). Una presión de 1 bar significa que dentro de la admisión hay una presión equivalente a la presión atmosférica. Un motor de automóvil puede llegar a tener una presión de 2 bar, o sea el doble que la presión atmosférica.

El funcionamiento del turbo se basa en una pequeña turbina compresora metida dentro de una caracola, unida por un eje a una turbina de empuje, que es impulsada por los gases de escape. El turbo gira a altas Rpm y para evitar la fricción y desgaste de sus componentes, su montaje se realiza en flotación de aceite, es decir, la bomba de aceite envía el caudal suficiente como para mantener en flotación el eje del turbo para evitar su desgaste y gripado del mismo. Todos los motores turbo alimentados llevan instalado un refrigerador de aceite, ya sea un radiador de aceite o un intercambiador de temperatura aceite-refrigerante, ya que el aceite al paso por el eje del turbo se expone a altísimas temperaturas.

Un motor sobrealimentado puede conseguir hasta un 40% más de potencia que un motor de iguales características no sobrealimentado. Este aumento de potencia se debe tener en cuenta a la hora de fabricar los motores con el objetivo de evitar sobrecalentamientos del motor o presiones y temperaturas excesivas de encendido en la cámara de combustión provocados por la alta capacidad de entrega de aire y presión. De todas formas, se emplean dispositivos que limitan la velocidad máxima o rendimiento de potencia para evitar perjudicar al motor.

Para realizar la sobrealimentación se necesita una máquina capaz de tomar el aire a la presión atmosférica y comprimirlo para conseguir una sobrepresión.

Este trabajo se encomienda a los compresores.

Los compresores se pueden clasificar de la siguiente forma:

– **Turbocompresores.** Son de tipo centrífugo. Se suelen denominar como turbo y son accionados por los gases de escape.

– **Compresores volumétricos.** Son accionados de forma mecánica por el cigüeñal del motor por medio de correas o engranajes.

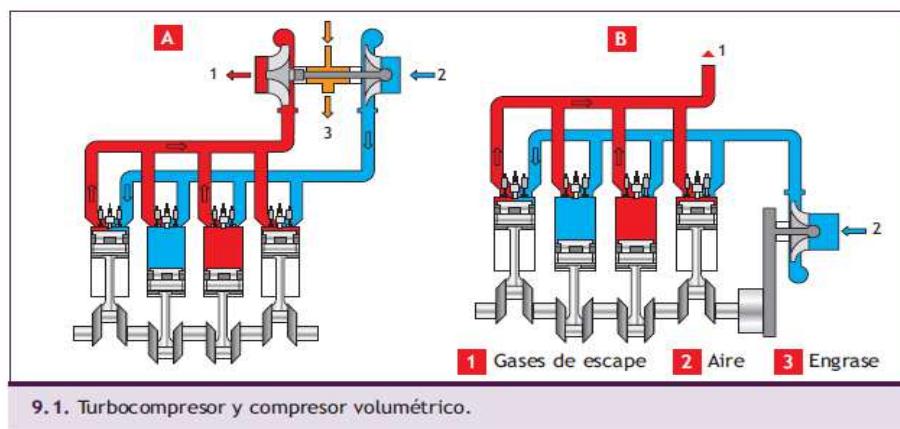


Imagen 178. Turbocompresor (A) y compresor volumétrico (B)

– **Comprex.** Son accionados de la misma forma que los compresores volumétricos. También llamados compresores de ondas a presión ya que la energía necesaria para la sobrealimentación es transmitida por contacto directo entre los gases de escape y los de admisión mediante ondas de presión.

### **4.2.6.1.- El turbocompresor**

El turbocompresor es una bomba de aire diseñada para operar con la energía que normalmente se pierde en los gases de escape del motor.

Estos gases impulsan la rueda de turbina (lado escape) que va acoplada a la rueda de compresor (lado admisión). Cuando giran, aportan un gran volumen de aire a presión, aumentando la presión en las cámaras de combustión del motor.

El turbocompresor es el más utilizado porque no consume potencia del motor y puede girar a más de 100.000 rpm. Se pueden clasificar en :

- Turbocompresores de geometría fija.
- Turbocompresores de geometría variable.

#### **Turbocompresor de geometría fija**

El conjunto turbocompresor está formado principalmente por una turbina (2) y un compresor (1) que se encuentran introducidos en sus respectivas carcasa de forma opuesta y unidas ambas por un eje común (3).

Tanto la turbina como el compresor contienen álabes para conseguir aumentar la presión de alimentación. En una parte anexa al turbo también se encuentra la válvula de descarga (4) wastegate, que se encarga de limitar la presión de sobrealimentación del turbo desviando una cantidad de gases de escape directamente al escape sin pasar por la turbina.

La carcasa de la turbina tiene forma de caracol para aumentar la velocidad de los gases haciéndolos incidir con mayor fuerza sobre sus álabes.

La carcasa del compresor tiene el mismo aspecto que la turbina, pero sus condiciones de utilización son menos extremas en cuanto a temperaturas, pero son iguales en cuanto a la presión que se produce en ellas.

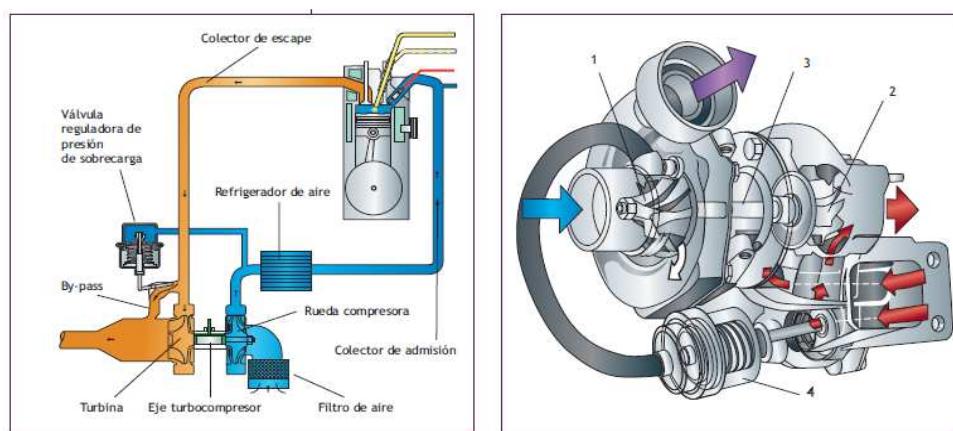


Imagen 179. Funcionamiento de un turbocompresor (izda)

Imagen 180. Estructura del turbocompresor (dcha)

En la parte central se ubica el eje que une la turbina y el compresor. Este eje está sometido a altas solicitudes mecánicas debido al giro y, además, debe soportar elevadísimas temperaturas (en torno a 900 grados).

El eje se apoya en el turbocompresor por medio de cojinetes o rodamientos (turbos muy pesados) en sus extremos y está en contacto con el circuito de engrase para conseguir un perfecto movimiento del eje y una refrigeración debido a las altas temperaturas. La falta de una lubricación correcta puede provocar la destrucción del turbo en cuestión de minutos.

De forma resumida se puede decir que al aceite que pasa por el turbo se le asignan dos principales tareas:

- Establecer una pantalla de estanqueidad entre los gases de escape, el aire introducido y las partes internas del turbocompresor.
- Transportar una parte muy elevada del calor cedido por los gases de escape a la turbina. Rebaja en unos 200 grados las partes del turbo que están en contacto con el aceite.

Para garantizar siempre la lubricación de los cojinetes, el motor no debe pararse inmediatamente después de haber efectuado recorridos a alta velocidad, recomendándose mantener el motor en ralentí durante un breve espacio de tiempo. Por otra parte, si las paradas son repetitivas con el motor en caliente se occasionarán erosiones y desprendimientos de incrustaciones de las paredes del cuerpo central.

### **Sistema de regulación de la presión del turbo**

La regulación de la presión de sobrealimentación permite suministrar al motor una presión límite variable de sobrealimentación, la cual está acorde con las condiciones de trabajo, tanto de solicitud de carga como a las climatológicas, temperatura del aire y presión atmosférica. Para ello, el turbocompresor dispone de una válvula mecánica wastegate encargada de regular la presión de soplado del mismo.

Esta válvula está situada en derivación (by-pass) con el conducto de escape. Está constituida por una cápsula sometida a la presión de sobrealimentación, una membrana y una cámara de presión con un muelle tarado. El accionamiento de esta válvula puede ser de tipo neumático o eléctrico.

– Regulación de la presión por accionamiento neumático.

Durante el funcionamiento del motor en ralentí o carga parcial la velocidad de los gases de escape es moderada creando una presión de sobrealimentación en el tubo (1) que es incapaz de abrir la válvula (4).

Cuando el motor gira a plena carga (elevadas revoluciones) la presión en el colector de admisión supera unos valores preestablecidos. Esta presión de soplado se transmite del colector de admisión a la válvula wastegate a través del tubo de conexión, que hace desplazar la membrana (2) y esta, a su vez, comprime el muelle (3) de la válvula (4) desplazándola de su asiento.

En esta situación parte de los gases de escape dejan de fluir por la turbina del turbocompresor, reduciéndose el efecto del compresor y disminuyendo la presión de alimentación en el lado de admisión.

– Regulación de la presión por accionamiento eléctrico.

La única diferencia con el sistema neumático es que se ha instalado una electroválvula de regulación intercalada en el tubo de unión entre el colector y la válvula mecánica. Esta electroválvula para limitación de la presión de sobrealimentación es excitada por la unidad de control del motor y la señal que reciba va a variar en función de las señales que llegan a la unidad de control, como las revoluciones del motor, temperatura del aire aspirado, presión en el colector de admisión, posición del pedal del acelerador y transmisor altimétrico.

Está compuesta por un bobinado eléctrico (3) que controla la posición de un inducido constituido por un émbolo (2) que, al desplazarse, puede cerrar el paso permanente que se establece entre A (colector de admisión) y B (conducto hacia la wastegate). Según el valor de la corriente recibida en el bobinado, el émbolo pasa a cerrar el conducto A y a establecer el paso directo entre C (presión atmosférica) y B.

La presión de control con que se acciona la válvula wastegate viene determinada por la proporción de periodo de la señal. De esta forma se gestiona la cantidad de caudal de gases de escape que pasa a accionar la turbina del turbocompresor. La presión de control se obtiene por medio de la combinación de la presión atmosférica y la presión de sobrealimentación.

Cuando el motor gira a bajas y medias revoluciones, la electroválvula de control deja pasar la presión de sobrealimentación que hay en el colector de admisión (conducto después del compresor) directamente hacia la válvula wastegate, cuya membrana es empujada para provocar la apertura de la válvula, pero esto no se producirá mientras que no se supere una presión de soplado suficiente para vencer la fuerza de tarado del muelle de la válvula.

Si las revoluciones aumentan demasiado, la fuerza e soplado abrirá la válvula y disminuirá el paso de gases de escape por la turbina, es decir, se disminuirá la sobrealimentación.

También puede ocurrir que la unidad de control considere que la presión en el colector puede sobrepasar ciertos límites de funcionamiento (circulación en altitud, elevada temperatura ambiente o aceleraciones fuertes) sin que esto sea un riesgo para el motor. Para ello actuará sobre la electroválvula y comunicará el conducto de presión atmosférica situado antes del compresor (colector de admisión) con el de la válvula wastegate, manteniéndose esta cerrada por no vencerse la presión del muelle, y provocando un aumento de la sobrealimentación al entrar en contacto todos los gases con la turbina.

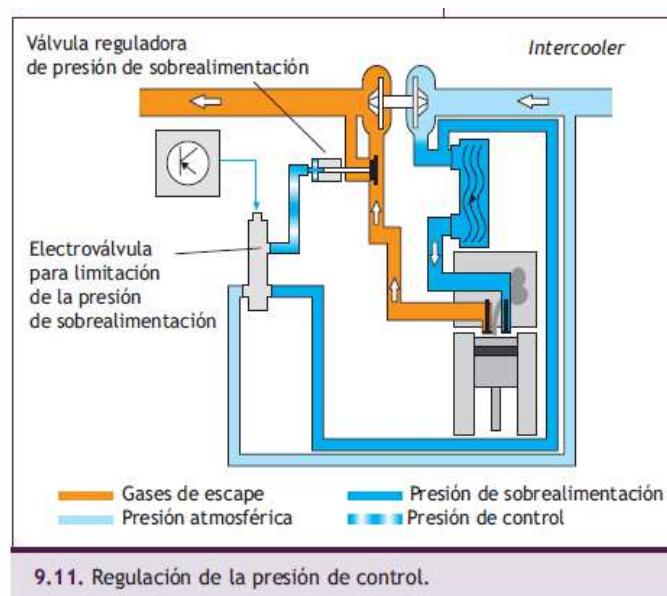


Imagen 181. Regulación de la presión de control

### Temperaturas de un turbo

Las diferencias de temperaturas que se alcanzan a un lado y otro del turbo son muy notables. En la turbina se pueden alcanzar temperaturas de 800 a 1 000 grados, mientras que en el compresor como máximo se alcanzan unos 80 grados.

Esto hace que el eje común al que se unen tanto la turbina como el compresor esté sometido a temperaturas muy diferentes en sus extremos, lo cual dificulta el diseño y sobre todo la elección de materiales para su construcción.

El turbo se refrigerará principalmente por el aceite de engrase, y además por el aire de entrada del colector de admisión que recoge parte del calor que contiene el rotores compresor. Hay que destacar que esto último no es nada beneficioso para el motor, ya que el aire caliente hace dilatar el aire de admisión y descender su densidad, con lo que el rendimiento volumétrico del motor se ve seriamente perjudicado.

#### Intercambiador de calor o intercooler

Es un sistema compuesto por un intercambiador de calor en el que se introduce el aire calentado que sale del rotores compresor para enfriarlo antes de introducirlo en los cilindros del motor.

El aire que incide sobre este intercambiador o radiador proviene del exterior durante la marcha del vehículo y consigue rebajar la temperatura del aire que pasa por el interior del intercooler unos 40 grados (el aire de admisión en motores turboalimentados puede alcanzar hasta 100 grados).

Por tanto, se trata de un intercambiador de calor aire/aire. Con él se consigue aumentar la potencia y el par del motor debido al aumento de la masa de aire que entra en el cilindro como consecuencia de la subida de densidad del aire cuando este enfriá. Otros efectos positivos resultantes de la utilización del intercooler son la disminución del consumo y de las emisiones contaminantes.

En ciertos motores el intercambiador es de tipo aire/agua, es decir, al aire se le fuerza a pasar por un radiador por el que circula el agua del sistema de refrigeración.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No consume energía en su accionamiento.</li> <li>- Fácil localización, sin accionamiento directo del eje del motor.</li> <li>- Reducido volumen en relación a su caudal proporcionado.</li> <li>- Gran capacidad de comprimir a altos regímenes y altos caudales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala capacidad de respuesta en bajas cargas por el poco volumen de gases.</li> <li>- Retraso en su actuación, por la inercia de la masa móvil y su aceleración mediante gases.</li> <li>- Alta temperatura de funcionamiento al accionarse con gases de escape.</li> <li>- Mayores cuidados de uso y mantenimiento.</li> </ul>

Tabla 22. Ventajas e inconvenientes del uso del turbocompresor

## Turbocompresor de geometría variable

Los turbocompresores de geometría variable tienen la característica de que a bajas revoluciones del motor se nota su efecto, eliminando el gran inconveniente de los turbocompresores de geometría fija.

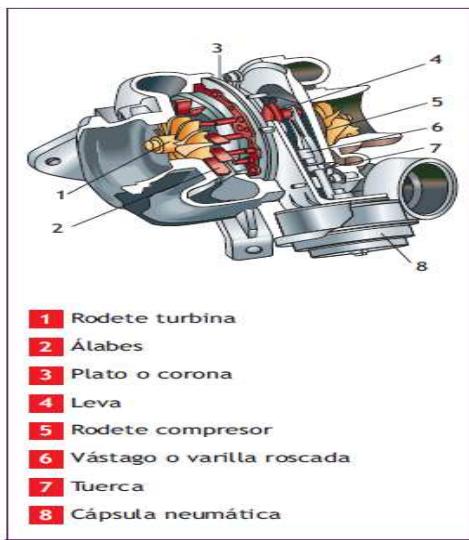


Imagen 182. Turbocompresor de geometría variable

Son los más implantados en vehículos modernos. Su funcionamiento es similar a los de geometría fija, pero con la salvedad de que estos no necesitan de una válvula de descarga, puesto que el sistema puede hacer disminuir el giro de la turbina y, por tanto, rebajar la presión a los valores preestablecidos en determinados modos de funcionamiento del motor.

La gestión electrónica en este caso es la encargada de hacer disminuir o aumentar la fuerza que ejercen los gases de escape sobre la turbina. Con esto se consiguen tiempos de respuesta del turbo muy breves, además de velocidad de gases alta y un funcionamiento progresivo de la turbina desde bajos regímenes.

Para conseguir los efectos anteriormente expuestos se ha dispuesto en la turbina de escape del turbocompresor una corona (3) con un número de álabes móviles (2) en su periferia. La corona, a su vez, se encuentra unida a una varilla (6) y esta a una cápsula neumática (8) dividida en dos cámaras.

Teniendo en cuenta que la presión que ejercen los gases de escape está relacionada con el número de revoluciones del motor, se podrán obtener diferentes regímenes de funcionamiento de la turbina según la orientación que tomen las paletas o álabes móviles, es decir, se variará la sección de paso de los gases de escape.

– Funcionamiento con bajos regímenes de rotación del motor .

En un turbocompresor convencional, en este estado de funcionamiento la presión que ejercerían los gases de escape sería baja, produciendo un giro lento de la turbina de escape y, como consecuencia, una presión de sobrealimentación mínima. Sin embargo, en un turbo de geometría variable, los álabes móviles se encuentran cerrados en su totalidad de forma que la sección de paso entre ellos es mínima. Esto hace aumentar la velocidad de los gases a su paso por ellos, creando una mayor velocidad de giro de la turbina y, por tanto, del compresor, aumentando la sobrealimentación en estos regímenes bajos.

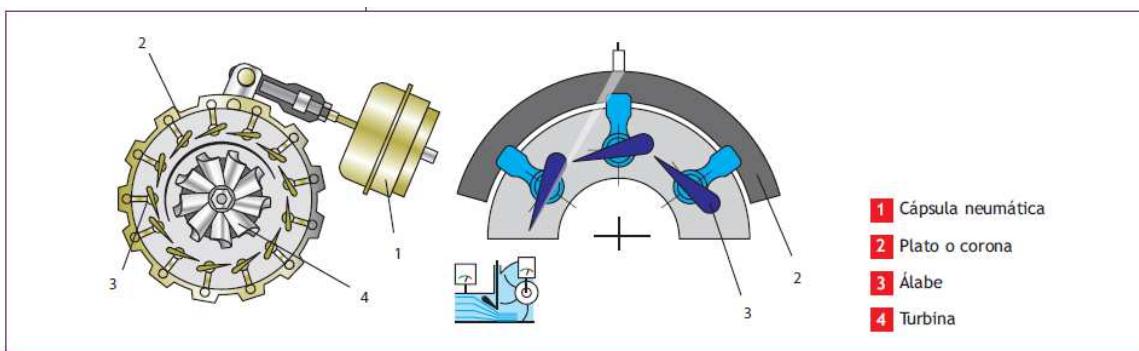


Imagen 183. Turbocompresor en regímenes bajos

Funcionamiento con regímenes altos de rotación del motor

Al aumentar la velocidad de giro aumenta de igual forma la velocidad de los gases de escape y, por tanto, su energía cinética. En esta situación, del mismo modo se eleva la velocidad del rotor del turbocompresor, aumentando la presión de sobrealimentación y actuando esta a través de un tubo de conexión sobre la membrana de la cápsula neumática, que hace variar por medio del conjunto de varillas la posición de los álabes móviles.

La posición final de los álabes móviles dependerá de la presión de sobrealimentación, estando estos totalmente abiertos (mayor sección de paso de gases) cuando se alcancen los valores máximos de presión establecidos.

Con este aumento de la sección de paso de los gases de escape va a disminuir la velocidad con la que van a incidir en el rotor de la turbina, obteniéndose velocidades de giro del compresor iguales o inferiores a las conseguidas con regímenes bajos.

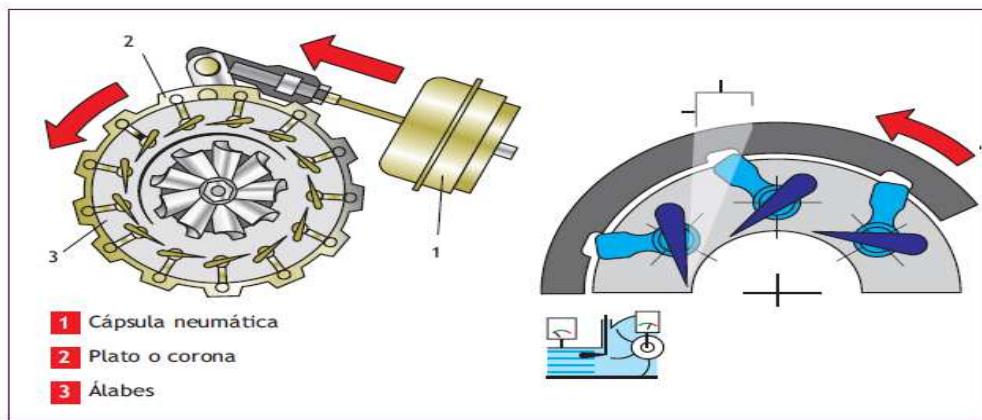


Imagen 184 . Turbocompresor a regímenes altos

#### Electroválvula reguladora de presión de sobrealimentación

En los turbos de geometría variable la presión de sobrealimentación es regulada en función de un mapa de curvas características programadas en la unidad de control del motor, la cual excita correspondientemente la válvula electromagnética (1) para la limitación de la presión de sobrealimentación.

La presión de control, con la que el depresor (2) acciona las varillas que actúan sobre los álabes móviles (3), se determina en función de la proporción de periodo de la señal. A través de los álabes móviles se influye sobre el caudal de los gases de escape que actúan contra la turbina.

La presión de control se constituye por una combinación de presión atmosférica y depresión.

Cuando el motor se encuentra en bajas revoluciones, la electroválvula de control es activada cuando recibe la señal de voltaje, cerrando el conducto que proviene de la admisión (presión atmosférica) y abriendo el de depresión (bomba de vacío), con lo que la membrana de la cápsula neumática es absorbida, actuando esta sobre el sistema de varillas y palancas desplazándolas hacia su izquierda.

En esta posición los álabes están dispuestos de forma que entre ellos exista la menor sección de paso que hace aumentar las revoluciones de giro de la turbina.

Cuando el motor está en altas revoluciones la unidad de control deja de activar la electroválvula y hace desplazar el émbolo de la misma hacia la derecha cerrando el conducto de depresión y abriendo el conducto de presión del colector de admisión.

En esta situación la propia presión hace desplazar en sentido de compresión a la membrana de la cápsula, desplazando esta hacia la derecha el sistema de varillas y palancas. En esta posición se desplaza al conjunto de aletas móviles a la posición de mayor sección de paso.

Con esto se reduce la velocidad de los gases de escape que pasan por la turbina de escape y, como consecuencia, se minimiza la presión de sobrealimentación de la rueda compresora.

Existe una posición intermedia de la electroválvula en la cual se obtiene igualmente una posición equilibrada de sección de paso de los gases de escape entre los álabes móviles, correspondiendo esta situación a la de carga parcial del motor

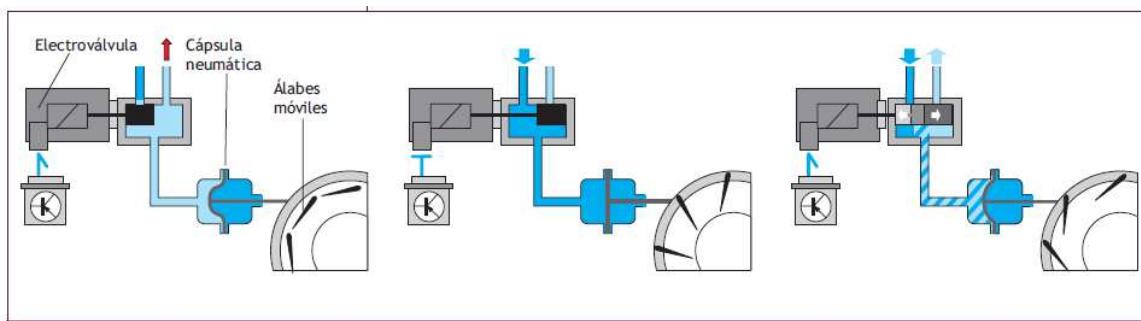


Imagen 185 .Estados de funcionamiento de la electrovalvula para regulacion de la presion de sobrealimentacion.

Las ventajas del turbocompresor de geometría variable con respecto al turbocompresor convencional se pueden resumir en la siguiente tabla:

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantienen la presión de sobrealimentación casi constante en todos los regímenes de funcionamiento.</li> <li>- Permiten conseguir un aumento de la potencia y del par entre un 10 y un 20%.</li> <li>- Mejoran el consumo de combustible y disminuyen la contaminación al tener una combustión más completa en todos los regímenes.</li> <li>- Consiguen una curva de potencia muy progresiva.</li> <li>- Aumentan la velocidad de los gases de escape que llegan a la turbina a altos regímenes.</li> <li>- Consiguen un mayor par motriz a bajos regímenes.</li> <li>- Consiguen una mayor potencia máxima a altos regímenes.</li> </ul>

Tabla 23. Ventajas de los turbos de geometría variable

#### **4.2.6.2 .-Compresor volumétrico**

Los compresores volumétricos son accionados mediante el cigüeñal, normalmente por una correa dentada o engranajes, pudiendo conseguir de 10 000 a 15 000 rpm. Se caracterizan por hacer circular el aire a mayor velocidad de la que proporciona la presión atmosférica, creando una acumulación de aire en el colector de admisión y, consecuentemente, una sobrepresión en el mismo.

El compresor volumétrico más utilizado en el automóvil es el compresor de lóbulos, conocido también como de tipo roots.

No disponen de válvula de descarga como en los turbocompresores, siendo la velocidad del motor la que limita la sobrealimentación.

Su principio de funcionamiento se basa en aspirar aire e introducirlo en una cámara que disminuye su volumen. Está compuesto por dos rotores (Imagen 186), cada uno de los álabes, con una forma de sección parecida a la de un ocho. Los rotores están conectados por dos ruedas dentadas y giran a la misma velocidad en sentido contrario, produciendo un efecto de bombeo y compresión del aire de forma conjunta.

Este compresor consigue impulsar el aire a mayor velocidad (Imagen 186 ).

Además los rotores no están en contacto el uno con el otro, ni cada uno de ellos con las paredes de la carcasa, siendo baja la estanqueidad del sistema y, por tanto, dando lugar a pequeñas fugas del aire.

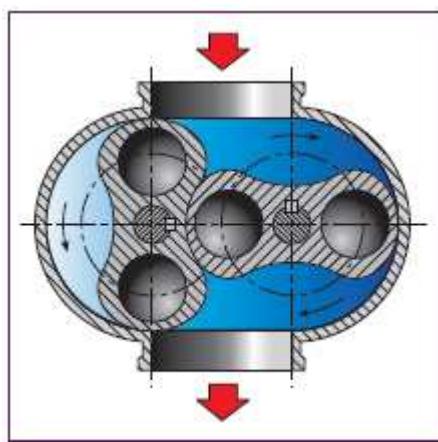


Imagen 186 .Compresor volúmetrico tipo roots

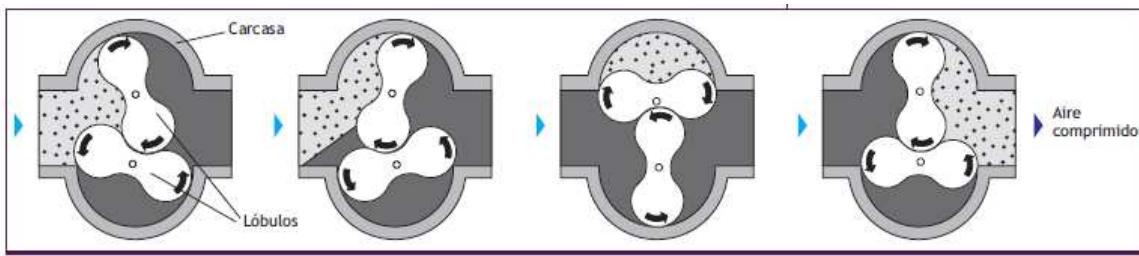


Imagen 187. Funcionamiento de compresor tipo roots

Con el fin de reducir los inconvenientes del compresor volumétrico de lóbulos se diseñó el denominado compresor lysholm, formado por dos piezas helicoidales que giran engranadas entre sí.

Aunque también es movido mediante correa por el cigüeñal, el rendimiento es algo superior al compresor roots, al disponer de un material que mejora el flujo de aire y que reduce su peso e inercia.

Por otra parte, otro tipo de compresor que actualmente está en desuso pero que la marca Volkswagen lo utilizó en varios de sus modelos fue el de tipo G. Este compresor se caracteriza por no tener elementos de compresión y sí disponer de un conducto en forma de caracol que provoca un movimiento oscilante de dos piezas que forman un canal helicoidal.

Una de las piezas es fija, mientras que la otra describe un movimiento circular (no rotativo) mediante una excéntrica.

El movimiento de la parte móvil va reduciendo el volumen del canal espiral de manera que se fuerza al aire a salir por un extremo a mayor velocidad y presión. Los grandes inconvenientes de este sistema son sus problemas de lubricación y estanqueidad.

De forma resumida, se detallan las ventajas e inconvenientes más importantes de los compresores volumétricos:

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobrealimentación racional y equilibrada en cualquiera de los regímenes de giro del motor.</li> <li>- Se ponen en marcha en el mismo instante de arranque del motor. Además aumentan y disminuyen de régimen al igual que lo hace el motor.</li> <li>- Respuesta inmediata a la demanda del acelerador. No tiene efecto de re-tardo.</li> </ul>
Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restan potencia al motor al ser accionados mecánicamente por el cigüeñal. Se cifra la pérdida en un 10% de la suministrada por el motor.</li> <li>- Bajo rendimiento según se aumenta la presión.</li> <li>- Son de gran tamaño dificultando su instalación en el motor.</li> </ul>

Tabla 24. Ventajas e inconvenientes del compresor volumétrico

### **4.2.6.3.-Compresor comprex**

Este tipo de compresores recibe el nombre de comprex por la forma de realizar la técnica de funcionamiento cambiador de la onda de presión. Se empezaron a implantar en los vehículos para mejorar las características del turbocompresor en bajas revoluciones del motor.

**Turbo comprex**  
 Este turbo ha sido el más utilizado por la marca de vehículos Mercedes, bajo la denominación compresor.

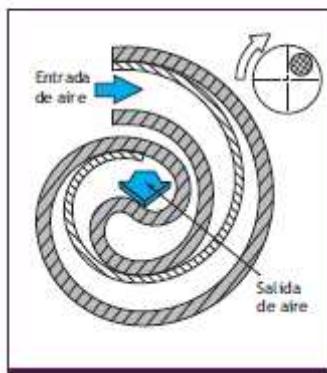


Imagen 188. Estructura del Turbo Comprex

El principio de funcionamiento de estos tipos de compresores se basa en transmitir por contacto directo al aire del colector de admisión los residuos de energía de presión contenidos en los gases de escape por medio de las finas paredes radiales de un tambor que recibe movimiento del cigüeñal del motor.

En este caso, la absorción de potencia del motor es mínima ya que el accionamiento tiene como único objetivo mantener al rotor en movimiento giratorio. La función de compresión la siguen realizando de forma exclusiva los gases de escape.

Su régimen de funcionamiento máximo está en torno a los 15 000 o 20 000 rpm, produciéndose a partir de aquí un descenso notable de su rendimiento.

A continuación, se detallan las ventajas e inconvenientes de este tipo de compresor:

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No consume energía en su accionamiento.</li> <li>- Respuesta inmediata al acelerador.</li> <li>- Incremento notable del par desde bajas vueltas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran tamaño del equipo.</li> <li>- Produce mucho ruido.</li> <li>- Mala localización por la necesidad de accionamiento mediante el motor.</li> <li>- Mala aplicación a motores de gasolina por un límite de giro muy pequeño.</li> <li>- No tiene posibilidad de alejar los gases de escape de la admisión; excesiva proximidad entre los mismos.</li> </ul>

Tabla 25. Ventajas e inconvenientes del turbo Comprex

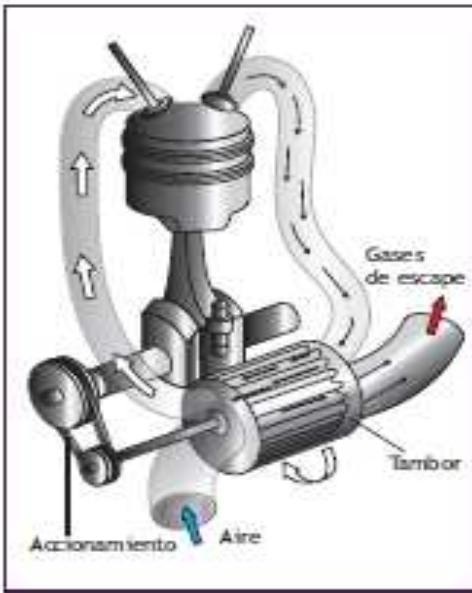


Imagen 189 . Compresor tipo Comprex

#### 4.2.6.4.-Sistemas biturbo

Los sistemas biturbo son montajes de dos turbos en vehículos de elevadas prestaciones. Son sistemas avanzados de gasolina biturbo que cuentan con dos turbos en línea, uno compuesto por un turbo centrífugo y otro por un compresor arrastrado por el motor.

La combinación de los turbos y su fase de trabajo está condicionada al par solicitado en cada momento. Con esta información la unidad controla:

- Trabajo del compresor, acoplando o no el mismo.
- Mariposa by-pass.
- Válvula de control de presión del turbo centrífugo.

Los tres elementos específicos del sistema son:

- **El turbo centrífugo**, que funciona por acción de los gases de escape. Es de geometría fija y su válvula de descarga es accionada de forma neumática.
- **El compresor de lóbulos o roots**, que funciona arrastrado por una correa desde el cigüeñal. Este permite aportar un volumen de aire extra cuando el régimen del motor es bajo, ya que el volumen es forzado por su propio mecanismo. Su activación depende de la unidad de control que, en función de las necesidades, aplicará o no una tensión al electroembrague del compresor.

– **La mariposa by-pass**, que es conmutada para desviar el flujo de aire en función de las necesidades. Es decir, conmutará el aire para que este proceda directamente del exterior o bien a través del compresor.

El sistema puede funcionar en los siguientes modos:

- **Funcionamiento sin carga.** Ocurre cuando el motor gira a un régimen bajo sin petición de carga; entonces la unidad desactiva el mando del acoplamiento del compresor, provocando que este no gire y, por tanto, que no haya pérdidas por arrastre. La mariposa de by-pass se encuentra abierta, permitiendo el paso de aire a presión atmosférica sin pasar por el compresor.

– **Petición de carga con régimen bajo-medio.** En este estado la unidad de control activa el electroembrague del compresor, de forma que este se acopla y gira. Esto provoca un aumento del volumen de aire que permite aumentar rápidamente el rendimiento del motor. La mariposa de by-pass está cerrada permitiendo el paso del aire a través del compresor. Una vez adquiridas las condiciones de trabajo necesarias, entra en juego el efecto de trabajo del turbo centrífugo, permitiendo aportar el volumen solicitado a un régimen mayor.

– **Petición de carga con régimen medio-alto.** Aquí, si la velocidad del turbo centrífugo es suficiente, la unidad de control no activará el compresor, pero en caso necesario sí lo activará. Además, la válvula by-pass se encuentra abierta no permitiendo el paso del aire por el compresor. Si la unidad activa al compresor al mismo tiempo modula la señal sobre la mariposa.

En la figura se ven representadas las fases de trabajo en función del régimen del motor y la presión media efectiva, indicando el funcionamiento solo como turbo o con la ayuda del compresor.

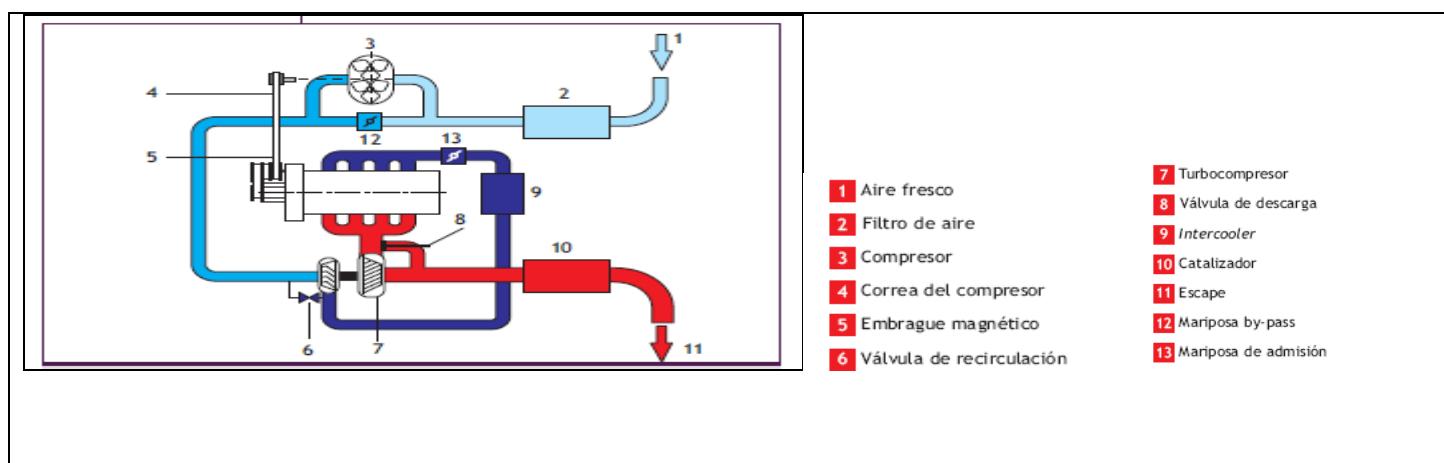
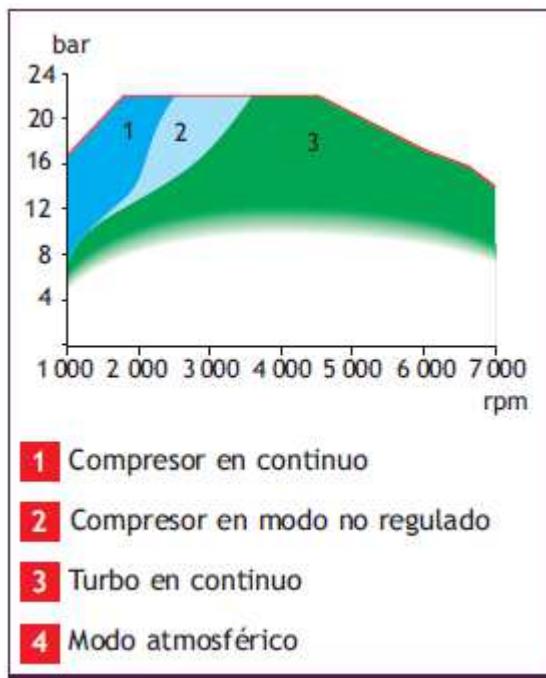


Imagen 190 .Sistema biturbo



Gráfica 22 . Fases de trabajo de un sistema biturbo

## Aplicaciones

Para solucionar el efecto conocido como turbo-lag, o retraso de respuesta en los motores turboalimentados, existen distintas soluciones. Una de ellas es el turbocompresor de geometría variable, que antes se ha comentado, con unos álabeles que varían el paso de los gases de escape y consiguen el efecto de aceleración de la turbina desde bajas vueltas. Son muy corrientes en los motores diesel, pero no tan comunes en los de gasolina porque la temperatura en los gases de escape de estos motores es muy elevada, y daban problemas de fiabilidad, ya superados (Porsche empezó a utilizarlos en el 911 Turbo en 2006) con las nuevas tecnologías de materiales.

Otra posibilidad son los turbocompresores denominados twin-scroll, en los que el turbocompresor cuenta con dos entradas separadas para los gases de escape, una para cada dos cilindros. Suele utilizarse en los motores de gasolina para separar los cilindros que suministran presión con los que pueden provocar una reducción de la misma al reaspirar los gases de escape. Por eso se separan los gases de los cilindros 1 y 4 por una entrada de los cilindros 2 y 3 por la otra, es decir, los que están en la carrera de escape con los de admisión.

El tercer sistema para mejorar la respuesta en un motor turboalimentado es la doble sobrealimentación. Y si bien lo más frecuente es utilizar un doble turbocompresor escalonado, uno más pequeño para conseguir una rápida respuesta en baja y otro mayor para suministrar más presión en alta (y por tanto más potencia), el grupo Volkswagen utiliza en sus TSI (o TFSI, según el que lo monte sea un Volkswagen o un Audi) un sistema de doble sobrealimentación mediante un turbo y un compresor.

### **El motor 1.4 TSI de Volkswagen**

Volkswagen estrenó el sistema de doble sobrealimentación mediante compresor y turbo en su motor 1.4 TSI. Lo llevan, entre otros muchos modelos, el VW Golf.



Imagen 191. Motor 1.4 TSI de VW

La idea cómo ya se ha expuesto es, utilizar un turbo del tamaño necesario para suministrar una presión elevada, y en vez de un turbo más pequeño, recurrir a un compresor volumétrico para generar presión cuando sería difícil mover la turbina del turbocompresor, es decir, a bajo régimen, cuando no hay suficientes gases de escape.

Es importante puntualizar, que la alimentación en dos etapas no es algo nuevo. Lancia [91] ya utilizó un sistema de doble sobrealimentación con compresor y turbo en su Delta S4 [92] allá por 1985, aunque con el objetivo de conseguir el máximo rendimiento y una potencia muy alta.

Sin ir más lejos, Porsche la utilizó a mediados de los años ochenta en el 959 [93], nacido Grupo B, que portaba un motor boxer de seis cilindros de 2.850 c.c. y 450 caballos de potencia a 6.500 rpm.

Tampoco podemos obviar a una marca como Toyota, que ya emplearía este sistema en el motor de seis cilindros en línea del Supra Biturbo [94] de 1993, que con 2.997 cc era capaz de entregar nada menos que 320 caballos de potencia a 4.000 rpm. El resultado de tanta potencia era un misil donde a medio recorrido se sumaba sin transición un segundo chorro de potencia. Volkswagen, por su parte, ha desarrollado este sistema para poder mejorar la técnica del downsizing, reduciendo la cilindrada de sus motores, y buscando, sobre todo, una mejora en el consumo.

### Funcionamiento del motor TSI

Cómo se ha comentado, la idea fundamental del desarrollo de los motores TSi es la utilización de un compresor volumétrico para generar potencia a bajas revoluciones y un turbocompresor para generar potencia a altas.

El funcionamiento del compresor, está basado en el principio Roots (Una característica de este tipo de compresores es su capacidad para mantener el giro cuando se produce un cambio de marchas).

El compresor está conectado al cigüeñal mediante una polea y un embrague electromagnético, y es capaz de generar hasta 2,8 bares de presión máxima desde un régimen apenas superior al ralentí, algo imposible para el turbo, y una cifra superior a los 2,5 bares de presión máxima absoluta que pueden generar compresor y turbo cuando trabajan juntos. Esto sólo sucede en un rango determinado de revoluciones. A partir de 2.400 rpm el compresor se desconecta, aunque si la carga (es decir, la presión sobre el acelerador) es alta, y hasta 3.500 rpm como máximo, puede sumar su efecto al del turbocompresor, por lo que sí trabajan de forma conjunta. Por encima de 3.500 rpm, sólo funciona el turbo.

La presión de inyección máxima se incrementa hasta 150 bares con el fin de obtener esta amplia gama de flujo transversal. Asimismo, la tecnología TSI hizo posible lograr una relación de compresión de 10:1, una cifra alta en motores sobrealimentados ya que anteriormente los motores que utilizaban turbos, difícilmente superaban relaciones de compresión superior a 8,5:1.

### Accionamiento de compresor y componentes auxiliares por correa poli-V

- El motor TSI 1.4 l dispone de dos correas poli-V.
- En el accionamiento de correa para los grupos auxiliares se implanta una correa poli-V de seis hileras. Se encarga de accionar desde la polea del cigüeñal la bomba de líquido refrigerante, el alternador y el compresor del climatizador.
- En el accionamiento de correa para el compresor se implanta una correa poli-V de cinco hileras. Se encarga de accionar el compresor a través de la polea del acoplamiento electromagnético.

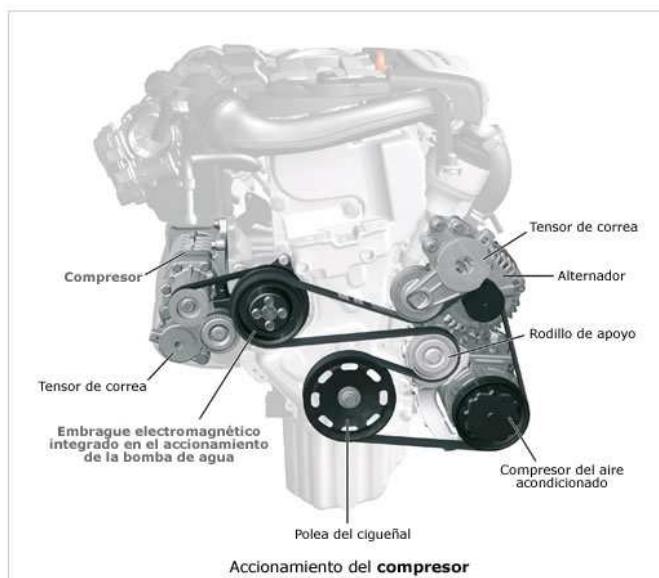


Imagen 192. Accionamiento del compresor

Ventajas:

- Rápida generación de la presión de sobrealimentación.
- Pares intensos a bajas revoluciones
- Sólo se activa en función de las necesidades.
- No requiere lubricación o refrigeración externas.

Desventajas:

- Consumo potencia del motor
- La presión de sobrealimentación se genera en función del régimen y luego se vuelve a perder una parte de la energía al someterse a regulación.

**3,0 Liter-V6-TFSI-Motor**  
Auflademodul  
3.0 litre V6 TFSI engine  
Supercharger module  
02/09



Imagen 193. Compresor motor V6 motor TFSI de Audi

### El motor 535d de BMW

Por otro lado, el motor 535d [95] de BMW es otro caso de aplicación de la sobrealimentación en dos etapas.

En cuestión el motor, que recibe la denominación RD6 y deriva del 3.0 diesel de 218 caballos (correspondiente al 530d), incorpora un doble turbo escalonado.

El motor del 535d, lejos de funcionar como un biturbo convencional, utiliza la tecnología de la sobrealimentación escalonada (Twin Turbo variable). En este sentido, se distingue de los primeros en que emplea dos turbos de distinto tamaño y situados en serie, en lugar de en paralelo (como ocurre con los motores que emplean doble turbo). De esta manera, cada turbocompresor puede activarse en función de lo que aceleramos y del régimen de giro.

Para estudiarlo bien, hagámoslo analizando sus tres estados diferenciados.

A bajas revoluciones: alrededor de las 1.100 rpm y con la mariposa de escape cerrada el aire de aspiración pasa libremente por la unidad de sobrealimentación grande y se comprime en la pequeña. De esa manera, el motor puede aspirar mucho aire y casi sin retardo a ralentí. Esto significa que disponemos de un par motor de 530 Nm a partir de tan sólo 1.500 rpm. Una cantidad muy superior a la que ofrecen los motores tradicionales de gasóleo.

A medio régimen: se produce alrededor de las 2.000 rpm y con la mariposa de escape semiabierta, mientras la de admisión permanece cerrada. De esta manera, ambos turbos trabajan de forma escalonada ?el aire de admisión se precomprime primero en el turbo grande, mientras el pequeño lo comprime a mayor presión y se alcanza una presión de soplado muy alta ?2,85 bares- con un par bastante elevado 560 Nm (57,1 mkg) desde 2.000 rpm. Todo ello da como resultado una respuesta bastante contundente.

A altas revoluciones: en torno a las 3.100 rpm, el turbo pequeño deja de funcionar, ya que las mariposas de escape y de admisión permanecen abiertas, motivo por el que los gases se evaden a través del turbo grande, el cual es el único que carga a regímenes elevados desde 3.200 hasta 4.600 rpm. En este caso, el motor es muy aprovechable a altas velocidades funcionando mejor que un turbo de geometría variable, dado que es muy aprovechable desde altas revoluciones. Basta señalar que a 4.400 rpm ya desarrolla toda su potencia de 272 caballos.

## **4.2.7.- Nuevos combustibles**

Dentro del objetivo del proyecto, que son los sistemas o mejoras aplicables a motores alternativos de combustión, para su mejora de rendimiento o la reducción de sus emisiones contaminantes, se ha considerado interesante el análisis de los nuevos combustibles que de una manera u otra se están empezando a usar a modo de sustitivos de combustibles fósiles, con el objetivo principal y básico, de reducir las emisiones contaminantes, que inevitablemente los derivados del crudo generan.

### **4.2.7.1.-Regulación e impacto social de los biocombustibles**

#### **4.2.7.1.1.- Las consecuencias de la dependencia energética**

El sector del transporte consume un 30% de toda la energía utilizada en el mundo. Esta cifra se eleva en la Unión Europea al 32% y en España al 39%. Actualmente se consumen diariamente en torno a 88 millones de barriles de petróleo en todo el mundo y las estimaciones indican que esta cifra aumentará hasta llegar a los 112 millones de barriles diarios en 2020. Cada año se utiliza una cantidad de petróleo en torno a cuatro veces superior a la que se descubre y así es imposible que salgan las cuentas.

Cómo ya se comentó en el apartado correspondiente, no es que el petróleo se vaya a acabar a corto plazo, pero extraer lo que queda se va haciendo cada vez más difícil y más caro. El suministro futuro depende de nuevos yacimientos, siempre de pequeño tamaño, y de la mejora en las tecnologías de extracción de los grandes pozos ya existentes, en su mayoría descubiertos en la década de los 70.

Más tarde o más temprano, la escasez de petróleo está asegurada, por lo que encontrar y desarrollar soluciones alternativas no sólo es una cuestión ambiental, sino también una necesidad estratégica de futuro. Los biocombustibles constituyen una salida poco traumática para paliar la escasez de crudo, ya que son capaces de sustituirlo sin necesidad de realizar grandes cambios en el parque móvil mundial.

Basamos nuestra movilidad en una fuente energética cuyo futuro está seriamente comprometido y esta es una razón más que suficiente para plantearse un cambio en el modelo energético, pero es que además se da la circunstancia de que el petróleo es un recurso distribuido geográficamente de manera desigual, y este es un aspecto que no se puede pasar por alto.

La Unión Europea depende de terceros para obtener más de la mitad del petróleo que consume, mientras que en España el porcentaje supera el 70%. Estos datos deberían hacernos reflexionar y llevarnos a cambiar, no sólo el modelo energético, sino también nuestros hábitos de consumo.

La caída libre del precio del petróleo generada por la peor crisis económica en 80 años pone en peligro las enormes inversiones necesarias para desarrollar energías alternativas y luchar contra el cambio climático.

#### **4.2.7.1.2.- La alternativa de los biocombustibles**

La utilización de los biocarburantes presenta diversas ventajas medioambientales, energéticas y socioeconómicas respecto a los combustibles convencionales derivados del petróleo que los convierten en un instrumento muy útil para el cumplimiento de las políticas comunitarias en materia de lucha contra el cambio climático y de seguridad de suministro por la vía de reducción de la dependencia del petróleo.

Un biocarburante o biocombustible es una mezcla de hidrocarburos que se utiliza como combustible en los motores de combustión interna y que deriva de la biomasa, materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Para la obtención de los biocarburantes se pueden utilizar especies de uso agrícola tales como el maíz o la mandioca, ricas en carbohidratos, o plantas oleaginosas como la soja, girasol y palmas. También se pueden emplear especies forestales como el eucalipto y los pinos.

En Europa, Argentina y Estados Unidos ha surgido diversa normativa que exige a los proveedores mezclar biocombustibles hasta un nivel determinado. Generalmente los biocombustibles se mezclan con otros combustibles en cantidades que varian del 5 al 10%.

El uso de biocarburantes tiene impactos ambientales negativos y positivos. Los impactos negativos hacen que, a pesar de ser una energía renovable, no sea considerado por muchos expertos como una energía no contaminante y, en consecuencia, tampoco una energía verde.

Una de las causas es que, pese a que en las primeras producciones de biocarburantes sólo se utilizaban los restos de otras actividades agrícolas, con su generalización y fomento en los países desarrollados, muchos países subdesarrollados, especialmente del sureste asiático, están destruyendo sus espacios naturales, incluyendo selvas y bosques, para crear plantaciones para biocarburantes.

La consecuencia de esto es justo la contraria de lo que se desea conseguir con los biocarburantes: los bosques y selvas limpian más el aire de lo que lo hacen los cultivos que se ponen en su lugar

Algunas fuentes afirman que el balance neto de emisiones de dióxido de carbono por el uso de biocarburantes es nulo debido a que la planta, mediante fotosíntesis, captura durante su crecimiento el CO<sub>2</sub> que será emitido en la combustión del biocarburante. Sin embargo, muchas operaciones realizadas para la producción de biocarburantes, como el uso de maquinaria agrícola, la fertilización o el transporte de productos y materias primas, actualmente utilizan combustibles fósiles y, en consecuencia, el balance neto de emisiones de dióxido de carbono es positivo.

Otras de las causas del impacto ambiental son las debidas a la utilización de fertilizantes y agua necesarios para los cultivos; el transporte de la biomasa; el procesado del combustible y la distribución del biocarburante hasta el consumidor. Varios tipos de fertilizantes tienden a degradar los suelos al acidificarlos. El consumo de agua para el cultivo supone disminuir los volúmenes de las reservas y los caudales de los cauces de agua dulce.

Algunos procesos de producción de biocarburante son más eficientes que otros en cuanto al consumo de recursos y a la contaminación ambiental. Por ejemplo, el cultivo de la caña de azúcar requiere el uso de menos fertilizantes que el cultivo del maíz, por lo que el ciclo de vida del bioetanol de caña de azúcar supone una mayor reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto al ciclo de vida de combustibles fósiles con más efectividad que el ciclo del bioetanol derivado del maíz. Sin embargo, aplicando las técnicas agrícolas y las estrategias de procesamiento apropiadas, los biocarburantes pueden ofrecer ahorros en las emisiones de al menos el 50% comparando con combustibles fósiles como el gasóleo o la gasolina.

El uso de biocarburantes de origen vegetal produce menos emisiones nocivas de azufre por unidad de energía que el uso de productos derivados del petróleo. Debido al uso de fertilizantes nitrogenados, en determinadas condiciones el uso de biocarburantes de origen vegetal puede producir más emisiones de óxidos de nitrógeno que el uso de productos derivados del petróleo.

Una solución real pero aún no disponible es la utilización de residuos agroindustriales ricos en hemicelulosas. De esta forma no se utilizarían áreas de cultivos nuevas ni utilización de alimento para la producción de biocarburantes. Un ejemplo de esto es la utilización de costra de remolacha, paja de trigo corona de maíz ó cortezas de árboles.

La hidrólisis de estos compuestos es más compleja que la utilización de almidón para la obtención de azúcares libres fermentables, por lo tanto, requiere de una mayor cantidad de energía inicial para procesar los compuestos antes de la fermentación, sin embargo, el costo de producción es casi nulo al considerar que se trata de residuos.

La única tecnología eficiente y limpia es la utilización de enzimas hemicelulolíticas. Existen tres puntos claves que se deben solucionar o perfeccionar antes de aplicar esta tecnología. 1) Se deben encontrar enzimas más estables y eficientes. 2) Métodos menos destructivos de inmovilización de enzimas para su utilización industrial. 3) Microorganismos capaces de fermentar eficientemente monosacáridos derivados de las hemicelulosas (xilosa y arabinosa principalmente).

#### **4.2.7.2.- Tipos de biocombustibles**

Los combustibles estudiados como más viables para el futuro son:

**-El Gas Licuado de Petróleo** cuya combustión a un motor de gasolina resulta sencilla y no muy costosa, lográndose así una combustión más limpia. El problema reside en el almacenamiento y el suministro. Actualmente se usa a pequeña escala en vehículos de servicio público.

**-El Gas Natural.** Necesita depósitos especiales para almacenarse, en forma de gas tiene que estar a 200 atmósferas de presión y en forma líquida, a -175° C de temperatura. Su rendimiento energético es 4 veces más bajo que el de la gasolina, aunque este depende de la capacidad que tenga el vehículo para almacenar el combustible (generalmente es baja), reduce las emisiones de dióxido de carbono y óxido de nitrógeno. BMW y Fiat ya tienen prototipos que trabajan con gas natural. Hay unos 75.000 vehículos propulsados por gas natural en Estados Unidos y cerca de 1 millón en el mundo. Uno de cada 5 autobuses en EEUU tiene como combustible el gas natural. Los tanques de almacenamiento tienen que tener periódicas inspecciones y mantenimiento, tienen de 2 a 3 años de vida de servicio y se extiende mientras requiere mantenimiento, Los tanques de gas natural son más seguros que los de gasolina. El costo de este combustible es menor que el de la gasolina.

**-Metanol**. Se obtiene del gas natural pero tiene un mayor poder energético. Ataca a ciertos plásticos y a metales como aluminio o el zinc. El metanol (un 85% de metanol y un 15% de gasolina es) para la aplicación y el metanol 100 con un 100% de pureza es para la aplicación. Requiere un depósito especial y modificaciones en el motor. Reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno. Existen más de 20.000 vehículos en uso actualmente. Usa lubricantes especiales que se suplen por medio de un pedido. El costo del metanol 85 es igual al de las gasolinas premium.

**-Butanol**, es, a diferencia del etanol, un compuesto químico con una cadena larga de hidrocarbonos siendo no polar, haciéndolo más similar a la gasolina, este mismo ha demostrado ser un combustible no corrosivo, que puede ser distribuido a través de las canalizaciones actualmente existentes (oleoductos) y es posible utilizarlo directamente en los coches de gasolina sin necesidad de modificarlos.

**-Etanol**. Alcohol producido de la basura. Etanol 85 (85% de etanol y un 15 % de gasolina) es para la aplicación de trabajos livianos y Etanol 95 (95% de etanol y un 5 % de gasolina) es para la aplicación de trabajos pesados. Se estima que habrá en las tiendas cerca de 250.000 vehículos. La potencia, la aceleración, el rendimiento y la velocidad crucero se pueden comparar con muchos de los combustibles convencionales. El uso de lubricantes especiales puede ser requerido, se debe consultar el manual o consultar al fabricante para saber cual es el tipo de aceite que debe ser usado.

**-Biodiesel**. Líquido producido a partir de recursos renovables como aceites vegetales, grasa animal, el biodiesel ha sido diseñado como una alternativa de combustible para políticas de energía no contaminantes. La potencia, el torque y los precios son similares a muchos de los combustibles diesel. Son necesarios tanques y filtros especiales en ambientes muy cálidos. El biodiesel puro no es toxico y es biodegradable. Para el uso de biodiesel se requiere una pequeña o ninguna modificación.

**-Hidrógeno** es el elemento más abundante en el universo, pero es raro encontrarlo sin combinación en la tierra. El hidrógeno es normalmente un gas y puede ser comprimido y puesto en cilindros, también puede ser un liquido pero el gas solo se convierte en liquido a temperaturas de -423.2° Fahrenheit. Hoy en día el hidrógeno se obtiene del rompimiento de combustibles hidrocarburos pero pueden ser producidos por electrólisis del agua y fotólisis, el mayor problema con el hidrógeno es que el tanque de almacenamiento requiere de varios tanques de combustibles. Para un contenido equivalente al de la gasolina el hidrógeno líquido requiere sistema de refrigeración, requiere de 6 a 8 veces mas espacio que la gasolina y el gas de hidrógeno comprimido requiere de 6 a 10 veces mas espacio.

Vamos a pasar a estudiar cada uno de ellos:

### **Gas licuado del petróleo**

El gas licuado del petróleo (GLP) es la mezcla de gases licuados presentes en el gas natural o disueltos en el petróleo. Los componentes del GLP, aunque a temperatura y presión ambientales son gases, son fáciles de licuar, de ahí su nombre. En la práctica, se puede decir que los GLP son una mezcla de propano y butano.

El propano y butano están presentes en el petróleo crudo y el gas natural, aunque una parte se obtiene durante el refinado de petróleo, sobre todo como subproducto de la destilación fraccionada catalítica (FCC, por sus siglas en inglés Fluid Catalytic Cracking).

Se inicia cuando el petróleo crudo procedente de los pozos petroleros llega a una refinación primaria, donde se obtienen diferentes destilados, entre los cuales se tienen gas húmedo, naftas o gasolinas, queroseno, gasóleos atmosféricos o diésel y gasóleos de vacío.

Estos últimos (gasóleos) de vacío son la materia prima para la producción de gasolinas en los procesos de craqueo catalítico. El proceso se inicia cuando estos se llevan a una planta FCC [96] y, mediante un reactor primario a base de un catalizador a alta temperatura, se obtiene el GLP, gasolinas y otros productos más pesados. Esa mezcla luego se separa en trenes de destilación.

### **GLP de gas natural**

El gas natural de propano y butano que pueden ser extraídos por procesos consistentes en la reducción de la temperatura del gas hasta que estos componentes y otros más pesados se condensen. Los procesos usan refrigeración o turboexpansores para lograr temperaturas menores de -40°C necesarias para recuperar el propano. Subsecuentemente estos líquidos son sometidos a un proceso de purificación usando trenes de destilación para producir propano y butano líquido o directamente GLP.

El GLP se caracteriza por tener un poder calorífico alto y una densidad mayor que la del aire.

#### Usos

Los usos principales del GLP son los siguientes:

- Obtención de olefinas, utilizadas para la producción de numerosos productos, entre ellos, la mayoría de los plásticos.
- Combustible para automóviles, una de cuyas variantes es el autogás.
- Combustible de refinería.
- Combustible doméstico (mediante garrafas o redes de distribución)

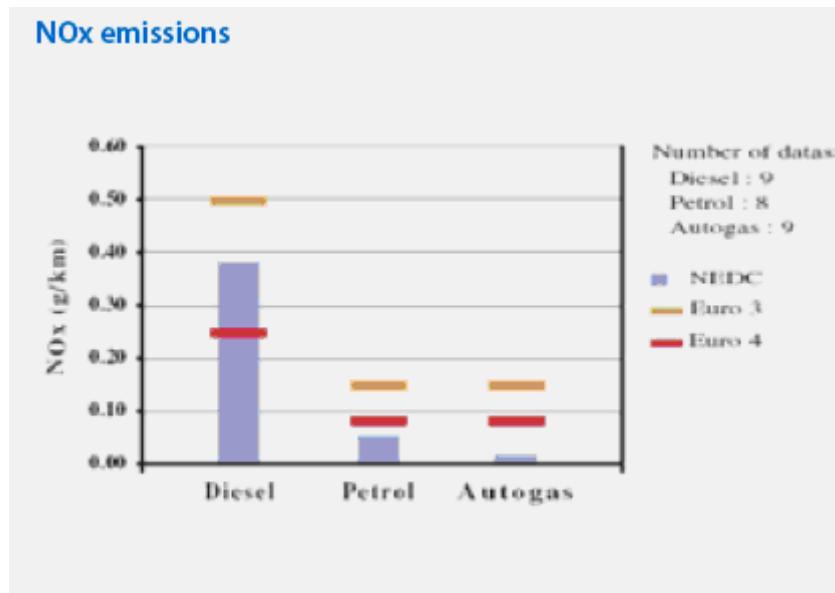
Actualmente, la oferta de autogas o GLP para la automoción excede la demanda en la mayoría de los países refinadores de petróleo, en consecuencia el precio es bajo comparado con otros hidrocarburos.

El GLP o GPL gas de petróleo licuado, es muy usado en vehículos menores (Autogás), pero hasta el momento es escaso en transporte público de tamaño grande. La tecnología de motor para los vehículos GLP es muy similar a la de los vehículos a gas natural pero con numerosos puntos a favor.

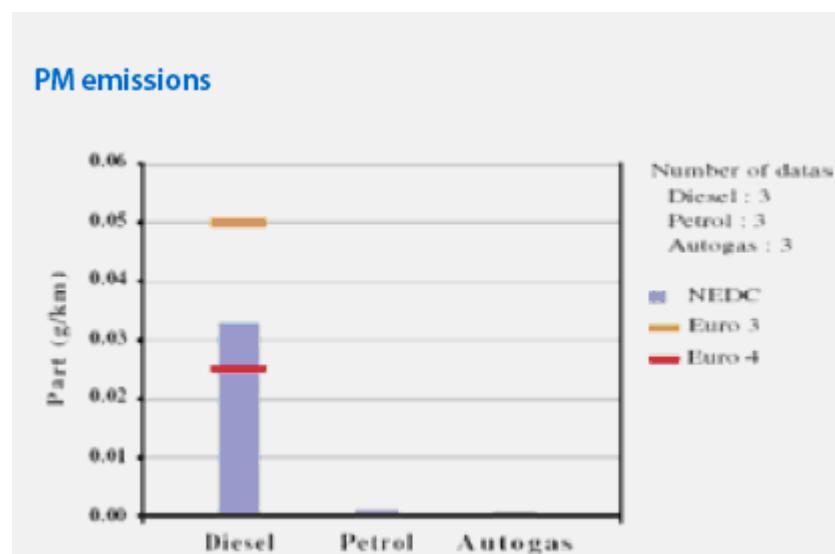
- Por su condición de gas, facilita una combustión más completa y limpia, que se refleja en la reducción del 90% de emisión de partículas
- Tiene mayor resistencia al autoencendido que la mejor gasolina, por tener 103 octanos.
- Sus gases de escape son más limpios, por tanto reduce la contaminación ambiental.

Cómo conclusiones del estudio llevado a cabo por la AEGPL ( Asociación Europea del Gas de Petróleo Licuado) [97] se obtiene que:

- Los vehículos con Autogás generan un 96% menos de NOx que un Diesel, y un 68% que un motor gasolina.



Gráfica 23. Emisiones de Nox en función del combustible



Gráfica 24. Emisiones de partículas en función del combustible

Basado en estimaciones conservadoras, los 7 millones de vehículos ya que corren sobre el Autogas en Europa representan los ahorros anuales de al menos 2.7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

A la luz de sus ventajas de reducción de CO<sub>2</sub> y la disponibilidad inmediata, hay una base convincente para un papel mayor del Autogas en el transporte por carretera de la Unión Europea.

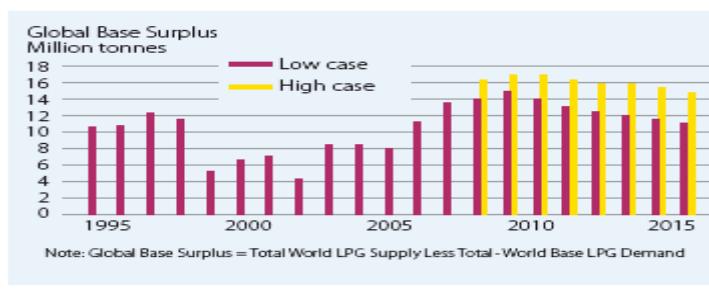
El autogas hace una contribución inmediata y significativa a los esfuerzos de la Unión Europea para reducir emisiones de CO<sub>2</sub> de vehículos y a los más amplios objetivos de reducir el total emisiones de CO<sub>2</sub> de la Unión Europea en un 20 % hacia 2020 y encontrar objetivos nacionales sobre la mitigación de cambio climático dentro del marco regulador post-Kyoto.

### Predicciones

Se apoyan en los estudios realizados por la empresa Purvin and Getz

Con un exceso de GLP anual pronosticado en los límites de 11-17 millones de toneladas hasta 2015, hay razones para creer que el Autogas puede solidificar su posición como uno de los combustibles alternativos principales de Europa en los años que venideros.

Estas perspectivas robustas son sostenidas por las reservas sustanciales de los materiales de la fuente del GLP, el gas natural y el aceite. La Agencia Internacional de la Energía puntualiza que: " La dotación mundial total de aceite es bastante grande para apoyar la subida proyectada de la producción y que, por todo el mundo, los recursos de gas natural son más que suficientes para cubrir con los objetivos de la demanda proyectada hasta 2030."



Gráfica 25. Estimaciones de consumo mundial de GLP

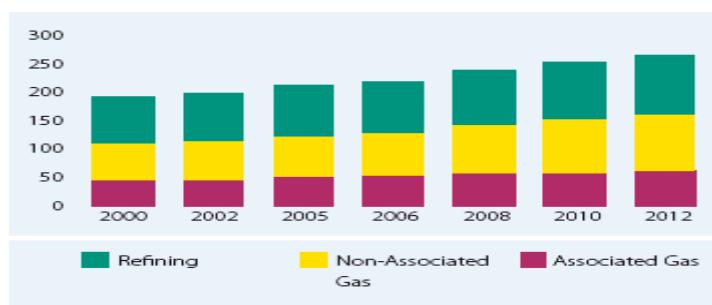
## Fuentes de extracción del GLP

Hay tres fuentes distintas de GLP:

1. Tratamiento durante extracción de gas
2. Tratamiento durante extracción del aceite
3. Como un producto que surge naturalmente durante la refinación del crudo

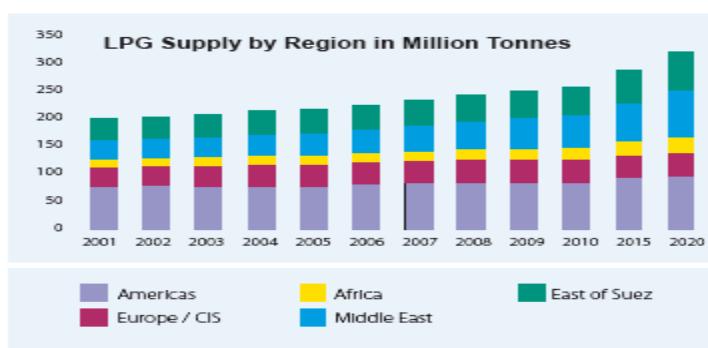
Actualmente, el 60 % de producción de GLP global viene de las fuentes 1 y 2, con la producción de campos de gas natural que constituyen una parte cada vez más significativa.

Producción en millones de toneladas de GLP en función de las fuentes anteriormente comentadas:



Source: Purvin and Gertz

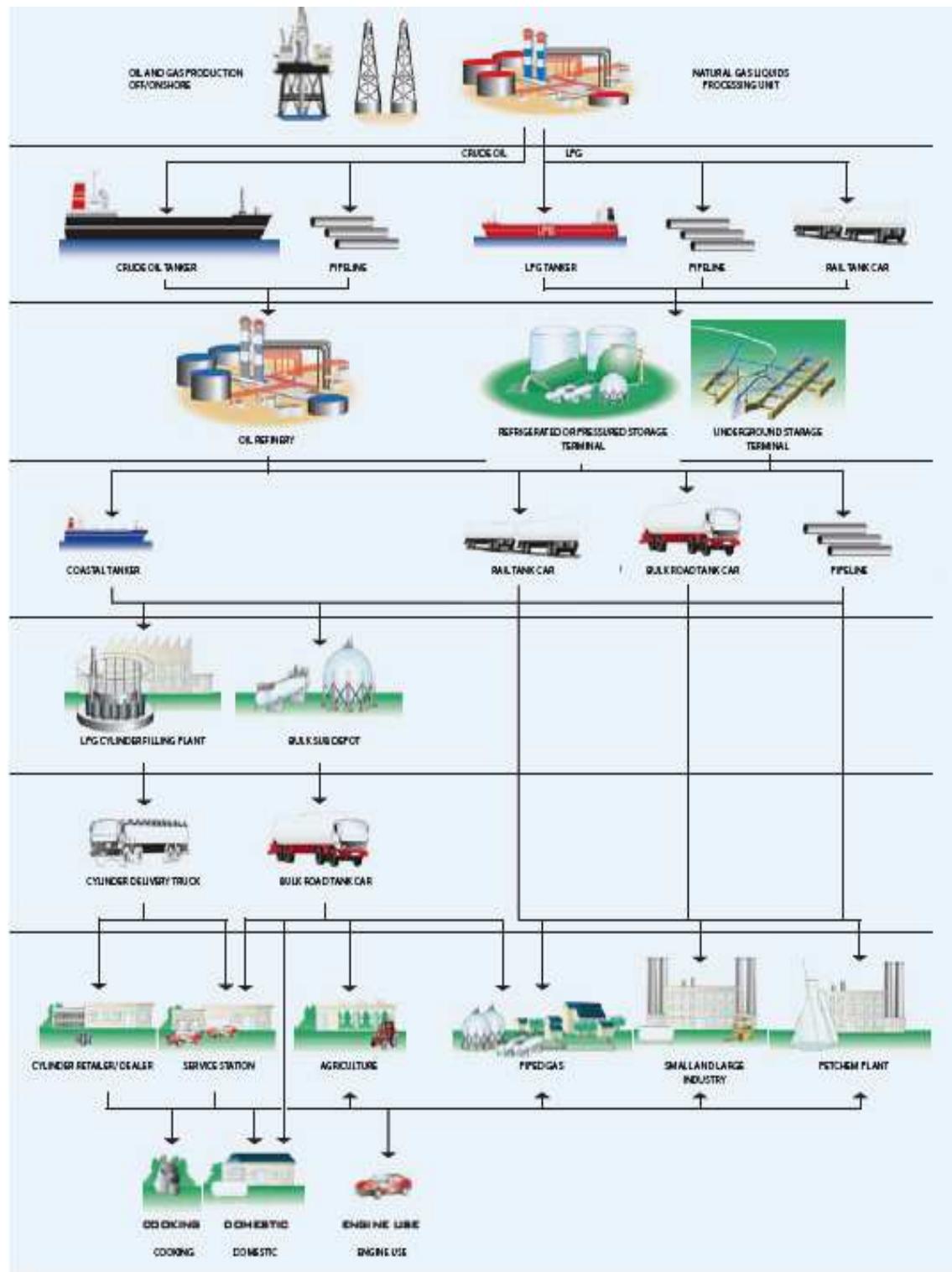
Gráfica 26. Producción en millones de toneladas de GLP [98]



Source: Purvin and Gertz

Gráfica 27. Suministro en millones de toneladas de GLP en función de regiones

## Logística y distribución



Source: World LP Gas Association

Imagen 194. Logística y distribución del GLP



Imagen 195. Estaciones de llenado en 2007

### Conclusiones respecto al GLP

El ahorro está sustentado con el hecho de que el costo del GLP es bastante inferior al de cualquier gasolina. Incluso que la gasolina de 84 octanos. Usando GLP en lugar de gasolina, se reducirá el gasto operativo del automóvil, o dicho de otra forma se conseguirá un ahorro de entre 40% y 50% del gasto actual en gasolina.

El autogas también reduce considerablemente los humos de escape. Debido a su alto octanaje, el autogas no requiere de aditivos, lo que se refleja en una menor cantidad de emisiones contaminantes.

Otro de los beneficios que permite el uso del autogas, es la imposibilidad de ser sustraído del depósito que lo almacena. Esto quiere decir que se elimina la posibilidad de pérdida del carburante, situación muy común con la gasolina en el caso de flotas de vehículos.

Por desgracia en España, aún existen pocas gasolineras que contemplan este combustible aunque estan bastante bien distribuidas y su aumento, sin duda alguna, dependerá de la demanda.

## **Metanol**

El metanol es utilizado como combustible, principalmente al mezclarlo con gasolina. Sin embargo, ha recibido menos atención que el etanol (combustible) porque tiene algunos inconvenientes. Su principal ventaja es que puede ser elaborado fácilmente a partir del metano (el principal componente del gas natural) así como por la pirólisis de muchos materiales orgánicos. El problema de la pirólisis es que solamente es económicamente factible a escala industrial, así que no es recomendable producir el metanol a partir de recursos renovables como la madera a pequeña escala (uso personal). En cualquier caso, el proceso alcanza temperaturas muy elevadas, con cierto riesgo de incendio; además, el metanol es altamente tóxico, así que se debe tener siempre especial cuidado de no ingerirlo, derramarlo sobre piel desnuda o inhalar los humos.

El metanol se puede producir a partir de biomasa; Rusia tiene un extenso programa para producir metanol a partir de eucalipto.

A diferencia del etanol, el metanol es un producto tóxico; la exposición extensa a él podría provocar daños irreversibles para la salud, incluyendo ceguera. La exposición máxima permitida en los EE. UU. en el aire (40 h/semana) es de 1.900 mg/m<sup>3</sup> para el etanol, de 900 mg/m<sup>3</sup> para la gasolina, y de 260 mg/m<sup>3</sup> para el metanol. Es también tremadamente volátil y por lo tanto aumentaría el riesgo de incendios o de explosiones. Además de los importantes riesgos de incendio y de explosión, una volatilidad más alta significa más emisiones por evaporación.

En la atmósfera y en el hígado, el metanol se oxida en dos toxinas altamente potentes: formaldehido (usado como conservante para la materia orgánica muerta en laboratorios), y ácido fórmico (el veneno encontrado en picaduras de la hormiga).

Los convertidores catalíticos degradarían en general estas dos toxinas de forma similar a como lo hacen ya con el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), o moléculas de monóxido de carbono (CO) si no fuera por el hecho de que los convertidores catalíticos funcionan debajo de la temperatura requerida hasta que el vehículo ha recorrido unos 10-15 km (unas 5-10 millas).

Es posible superar este problema ambiental de dos maneras. En primer lugar, existe la opción (muy costosa) de agregar más elementos catalizadores al panal de aluminio del convertidor. Pero los catalizadores suelen ser el platino, el paladio, y el rodio metales muy raros y por lo tanto caros. Como ejemplo, el paladio cuesta cerca de 5.500 €/kg.

El platino cuesta aún más: 26.200€/kg. Este es el motivo por el cual los convertidores catalíticos contienen tan poco catalizador: los catalizadores son demasiado costosos para ser utilizados extensamente de manera que se consiguiese el rendimiento que se espera de ellos.

Alternativamente, un calentador eléctrico (como el calentador de motores diésel) serviría para precalentar el convertidor que un poco más que el motor por sí mismo más rápidamente. El convertidor catalítico todavía estaría funcionando por debajo de la temperatura requerida por un cierto tiempo, pero menos que en un vehículo sin modificar, así los niveles de contaminación se reducen perceptiblemente. Obsérvese que los vehículos híbridos son más fáciles modificar pues tienen ya sistemas de batería que pueden proveer suficiente energía para calentar el catalizador a una temperatura más adecuada, mientras que los coches convencionales pueden necesitar modificaciones eléctricas.

Un problema adicional del metanol es que su contenido en energía, su PCI, es de solamente es 45% que el de la gasolina y el 75% del etanol.

### Comparaciones

Combustible	Densidad Energetica	Proporción de Mezcla Aire - Combustible	Energía Específica	Calor de Vaporización	RON	MON
Gasolina y Biogasolina	32 MJ/L	14.6	2.9 MJ/kg air	0.36 MJ/kg	91-99	81-89
Butanol	29.2 MJ/L	11.1	3.2 MJ/kg air	0.43 MJ/kg	96	78
Etanol	19.6 MJ/L	9.0	3.0 MJ/kg air	0.92 MJ/kg	107	89
Metanol	16 MJ/L	6.4	3.1 MJ/kg air	1.2 MJ/kg	106	92

Tabla 26. Comparativa de combustibles

El metanol es un combustible alternativo para motores de combustión interna y otros, ya sea en combinación con gasolina o directamente ("puro"). Se utiliza en los coches de carreras y en China. En los EE.UU., combustible de metanol ha recibido menos atención que el combustible etanol, como una alternativa a los combustibles derivados del petróleo; ya que en la década de 2000 en particular, con el apoyo de etanol a base de maíz, le ofrecía ciertas ventajas políticas. En general, el etanol es menos tóxico y tiene una mayor densidad de energía, aunque el metanol es menos caro de producir sosteniblemente y es una manera menos costosa para reducir la huella de carbono.

El metanol se puede hacer a partir de recursos fósiles o renovables, en particular gas natural y biomasa, respectivamente.

### **Aplicación**

En Brasil se intentó agregar un porcentaje de metanol a la gasolina y casi fue aprobado un experimento piloto propuesto por un grupo de científicos que investigaban la adición a la gasolina de metanol entre 1989 y 1992. El experimento a gran escala que debía ser probado en São Paulo fue vetado a última hora por el alcalde de la ciudad, por la preocupación por la salud de los trabajadores de las gasolineras (la mayoría de los cuales son analfabetos y no se puede esperar que sigan medidas de seguridad). Hasta 2006, la idea no ha vuelto a proponerse.

Desde el accidente de siete coches en las 500 millas de Indianápolis en la segunda vuelta de 1964 se decidió prohibir la gasolina cuando Eddie Sachs y Dave McDonald murieron en el choque. Sin embargo, cuando el coche Johnny Rutherford empezó a arder al entrar en la bola de fuego que se había producido el incendio que formó fue mucho menor al estar su coche lleno con metanol.

Hoy en día se utiliza metanol puro o mezclas de metanol y etanol en una proporciones 90%, 10% respectivamente.

### **Etanol**

Se denomina así al alcohol etílico deshidratado (99.4% de pureza) utilizado en motores de combustión, que sustituyen a la nafta en forma parcial y/o total. La denominación puede ser tanto etanol con bioetanol (en este estudio ya que nos referimos al combustible), la idea de cambiar la designación es, en el uso general distinguir entre el alcohol y el combustible.

Estos alcoholes tienen un alto contenido de oxígeno (hoy todas las naftas llevan agregados de oxigenantes) y se pueden obtener de distintas fuentes:

- Materias ricas en sacarosa: como la caña de azúcar, la melaza y el sorgo dulce.
- Materias ricas en almidón: como los cereales (maíz, trigo, cebada, etc.) y los tubérculos (camote, papa, etc).
- Materias ricas en celulosa: como la madera y los residuos agrícolas.

### **Definición y características**

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. Las plantas crecen gracias al proceso de fotosíntesis, en el que la luz del sol, el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y los nutrientes de la tierra forman moléculas orgánicas complejas como el azúcar, los hidratos de carbono y la celulosa, que se concentra en la parte fibrosa la planta.

El etanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible. El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10%, E5 [99] y E10 [100] respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.

Un obstáculo importante es la legislación europea sobre la volatilidad de las gasolinas que fija la proporción de etanol en mezclas E5. Concentraciones más elevadas, autorizadas en Suecia y Estados Unidos, implica que se debe disponer de un vehículo flexible (FFV) [101], con un depósito, motor y sistema de combustible único capaz de funcionar con gasolina y etanol, solos o mezclados en cualquier proporción. La otra alternativa para su uso es en forma de aditivo de la gasolina como etil-tercbutil éter (ETBE).[102]

Las especificaciones para la utilización de bioetanol se comprendían en la norma Europea de Gasolinas EN 228 [103], en España se encuentra transpuesta la Directiva 2003/17/CE [104] relativa a la calidad de las gasolinas y gasóleo, en el Real Decreto R.D. 61/2006 [105] de las especificaciones y uso de biocarburantes.

## Aplicaciones

Para poder utilizar el etanol como combustible puro (E100) [106] se necesitan llevar a cabo una serie de modificaciones en el motor, para no alterar significativamente el consumo.

Estas son:

- Aumentar la relación de compresión.
- Variar la mezcla de combustible/aire.
- Colocar bujías resistentes a mayores temperaturas y presiones.
- Colocar conductos resistentes al ataque de alcoholes.
- Agregar un mecanismo que facilite el arranque en frío.

La forma más común y sencilla de utilización de este combustible es en forma parcial hasta un 15% (E10 o E15 [107]) sin ser necesaria modificación alguna en el motor, aunque pequeñas modificaciones en la relación de compresión y relación aire/combustible, puede mejorar la potencia.

A medida que aumenta el agregado de alcohol en la mezcla, la combustión libera menor cantidad de contaminantes a la atmósfera, en especial CO.

## Procesos de obtención de etanol

El bioetanol se obtiene a partir de la remolacha (u otras plantas ricas en azúcares), de cereales, de alcohol vírico o de biomasa, mediante un proceso de destilación. En España la producción industrial emplea principalmente cereal como materia prima básica, con posibilidad de utilizar los excedentes de la industria remolachera transformados en jugos azucarados de bajo costo. En general, se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

- Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha, por ejemplo.
- Cereales, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa.

El esquema general de fabricación del bioetanol (Imagen 196) , muestra las siguientes fases en el proceso:

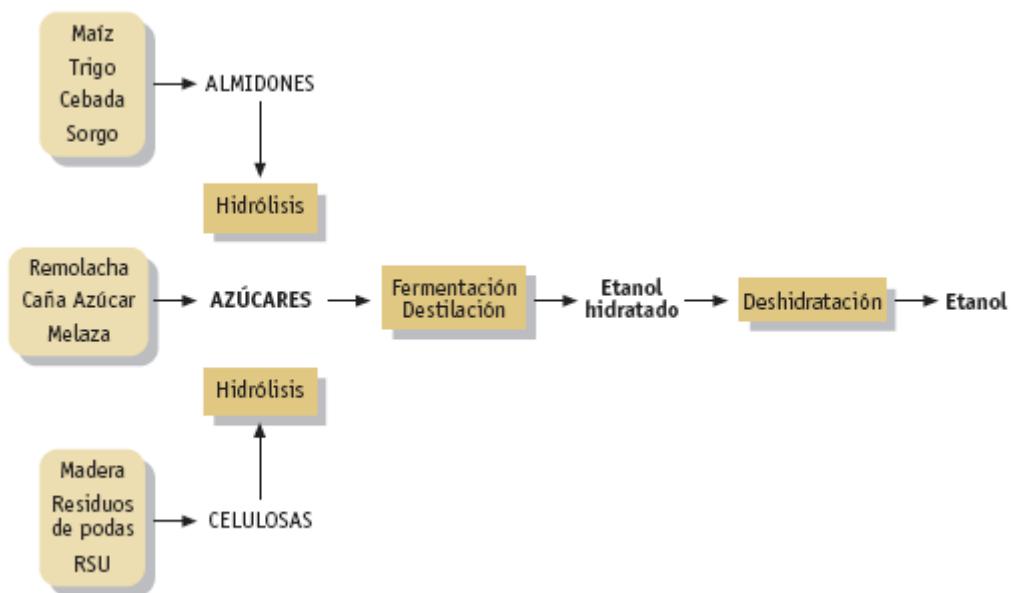


Imagen 196. Esquema de la fabricación del bioetanol

#### Dilución:

Es la adición del agua para ajustar la cantidad de azúcar en la mezcla o (en última instancia) la cantidad de alcohol en el producto. Es necesaria porque la levadura, usada más adelante en el proceso de fermentación, puede morir debido a una concentración demasiado grande del alcohol.

#### Conversión:

La conversión es el proceso de convertir el almidón/celulosa en azúcares fermentables. Puede ser lograda por el uso de la malta, extractos de enzimas contenidas en la malta, o por el tratamiento del almidón (o de la celulosa) con el ácido en un proceso de hidrólisis ácida.

#### Fermentación:

La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico realizado por las levaduras, básicamente. De la fermentación alcohólica se obtienen un gran número de productos, entre ellos el alcohol

**Destilación o Deshidratación:**

La destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla (etanol/agua). Una forma de destilación, conocida desde la antigüedad, es la obtención de alcohol aplicando calor a una mezcla fermentada.

Otra alternativa a las cosechas dedicadas a fines energéticos, son los materiales lignocelulícos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol, el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, con alto contenido en biomasa. Estos residuos pueden ir desde la paja de cereal a las "limpias" forestales, pasando por los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o las cáscaras de cereal o de arroz. Los residuos tienen la ventaja de su bajo coste, ya que son la parte no necesaria de otros productos o procesos, salvo cuando son utilizados en la alimentación del ganado. Los RSU tienen un alto contenido en materia orgánica, como papel o madera, que los hace una potencial fuente de materia prima, aunque debido a su diversa procedencia pueden contener otros materiales cuyo pre proceso de separación incremente mucho el precio de la obtención del bioalcohol.

También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales. Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación [Cabrera, J. A., 2006].

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, ésta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Los principales métodos para extraer estos azúcares son tres: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática. En la gráfica 2 se muestra las diferencias entre los procesos de obtención de bioetanol, según sea su materia prima de origen.

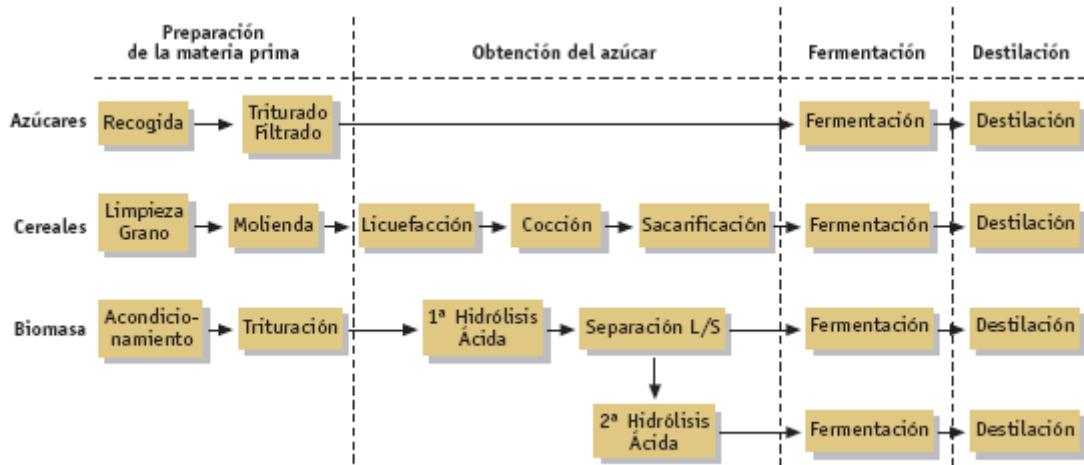


Imagen 197. Diferencias en los procesos de obtención de bioetanol.

Otro ejemplo de proceso de obtención de bioetanol a partir de alcohol vírico, lo lleva a cabo la empresa Acciona-Energía[108] en la planta de Alcázar de Juan [109], donde se procede a la limpieza y deshidratación del alcohol bruto, adquirido en las licitaciones que realiza trimestralmente el Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA)[110] [, para elevar su pureza del 92 % al 99,9 % y comercializarlo, una vez desnaturizado, como bioetanol.

El proceso comprende las siguientes fases:

Desulfuración:

Eliminación del anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) presente en el alcohol bruto.

Deshidratación:

Reducción del contenido en agua mediante su tamizado con zeolitas, sustancias que captan las moléculas de agua.

**Desmetilización:**

Proceso en el que el alcohol ya deshidratado (99,9%) ve separado su contenido de metanol. Esta sustancia resulta corrosiva para los vehículos y puede ser comercializada como producto químico o combustible

**Almacenamiento en depósitos:**

Desde ellos el producto se transporta por tuberías a la cisterna de carga y en ese trayecto se le añade una sustancia que desnaturaliza el bioetanol para evitar así su derivación al consumo humano.

**Subproductos de la obtención del bioetanol**

Los subproductos generados en la producción de bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos:

**Materiales lignocelulícos:**

Tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta. En general se utilizan para valorización energética en cogeneración, especialmente para cubrir las necesidades energéticas de la fase de destilación del bioetanol, aunque también se puede vender el excedente a la red eléctrica (con precio primado).

**Materiales alimenticios:**

pulpa y granos de destilería de maíz desecados con solubles (DDGS), que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del bioetanol. Tienen interés para el mercado de piensos animales por su riqueza en proteína y valor energético.

La caña de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética. La remolacha azucarera genera, por su parte, unas 0,75 ton de pulpa por tonelada de bioetanol producido.

La producción de bioetanol a partir de trigo o maíz genera en torno a 1,2 ton de DDGS por tonelada de bioetanol. En general, existen dos filosofías alimenticias en cuanto al empleo del DDGS. Cuando el pienso está en el 15 % o menos de la dieta, el DDGS sirve como una fuente de proteína suplementaria. Cuando el pienso está en los niveles más altos (superior al 15 % de la dieta de la materia seca) su papel primario es como fuente de energía. El DDGS está compuesto de grasa "en un 10-15 %", de fibra neutra detergente "en un 40-55 %", de proteína de crudo (CP) "en un 30-35 %" y de ceniza en un 5 %.

### **Balance energético de la producción de bioetanol**

Para que el etanol contribuya perceptiblemente a las necesidades de combustible para el transporte, necesitaría tener un balance energético neto positivo. Para evaluar la energía neta del etanol hay que considerar cuatro variables: la cantidad de energía contenida en el producto final del etanol, la cantidad de energía consumida directamente para hacer el etanol, la calidad del etanol resultante comparado con la calidad de la gasolina refinada y la energía consumida indirectamente para hacer la planta de proceso de etanol.

Aunque es un asunto que crea discusión, algunas investigaciones que hagan caso de la calidad de la energía sugieren que el proceso toma tanta o más energía combustible fósil (en las formas de gas natural, diesel y de carbón) para crear una cantidad equivalente de energía bajo la forma de etanol. Es decir, la energía necesitada para funcionar los tractores, para producir el fertilizante, para procesar el etanol, y la energía asociada al desgaste y al rasgón en todo el equipo usado en el proceso (conocido como amortización del activo por los economistas) puede ser mayor que la energía derivada del etanol al quemarse.

Se suelen citar dos defectos de esta argumentación como respuesta, en primer lugar el no dar importancia a la calidad de la energía del bioetanol, cuyos efectos económicos son importantes. Si se compara la calidad de la energía con los costes de descontaminación del suelo que provocan los derrames de gasolina al ambiente y los costes "módicos" de la contaminación atmosférica (porque no se puede descontaminar la atmósfera), resultado de la refinación y de la gasolina quemada. Por otro lado, el desarrollo de las plantas de etanol implica un prejuicio contra este producto basado estrictamente sobre la pre-existencia de la capacidad de refinación de la gasolina. La decisión última se debería fundar sobre razonamientos económicos y sociales a largo plazo.

El primer argumento, sin embargo, sigue debatiéndose. No tiene sentido quemar 1 litro de etanol si requiere quemar 2 litros de gasolina (o incluso de etanol) para crear ese litro. La mayor parte de la discusión científica actual en lo que al etanol se refiere gira actualmente alrededor de las aplicaciones en las fronteras del sistema. Esto se refiere a lo completo que pueda ser el esquema de entradas y salidas de energía. Se discute si se deben incluir temas como la energía requerida para alimentar a la gente que cuida y procesa el maíz, para levantar y reparar las cercas de la granja, incluso la cantidad de energía que consume un tractor.

Además, no hay acuerdo en qué clase de valor dar para el resto del maíz, como el tallo por ejemplo, lo que se conoce comúnmente como coproducto. Algunos estudios propugnan que es mejor dejarlo en el campo para proteger el suelo contra la erosión y para agregar materia orgánica. Mientras que otros queman el coproducto para accionar la planta del etanol, pero no evitan la erosión del suelo que resulta, lo cual requerirá más energía en forma de fertilizante.

Dependiendo del estudio, la energía neta varía de 0,7 a 1,5 unidades de etanol por unidad de energía de combustible fósil consumida. En comparación si el combustible fósil utilizado para extraer etanol se hubiese utilizado para extraer petróleo y gas se hubiesen llenado 15 unidades de gasolina, que es un orden de magnitud mayor. Pero, la extracción no es igual que la producción. Cada litro de petróleo extraído es un litro de petróleo agotado.

Para comparar el balance energético de la producción de la gasolina a la producción de etanol, debe calcularse también la energía requerida para producir el petróleo de la atmósfera y para meterlo nuevamente dentro de la tierra, un proceso que haría que la eficiencia de la producción de la gasolina fuese fraccionaria comparada a la del etanol. Se calcula que se necesita un balance energético de 200 %, o 2 unidades de etanol por unidad de combustible fósil invertida, antes de que la producción en masa del etanol llegue a ser económicamente factible.

## Logistica, distribución y producción

Actualmente existen dos plantas de bioetanol en operación situadas en Cartagena y La Coruña, con una capacidad de 142 y 168 millones de litros al año (Mlt/año), respectivamente, y cuya producción se destina en exclusiva a la obtención de ETBE en las refinerías españolas y a la exportación. Aunque por el momento en España el bioetanol no tiene uso como carburante, a diferencia de otros países como Brasil y Estados Unidos, se prevé que durante el primer trimestre de 2006 se ponga en marcha en Salamanca la primera planta de producción de bioetanol destinado a mezcla directa con gasolina, con una capacidad de 200 Mlt/año. Asimismo, a la fecha de este informe, existen 6 proyectos en desarrollo que, en caso de completarse, supondrían una capacidad adicional de 745 Mlt/año.

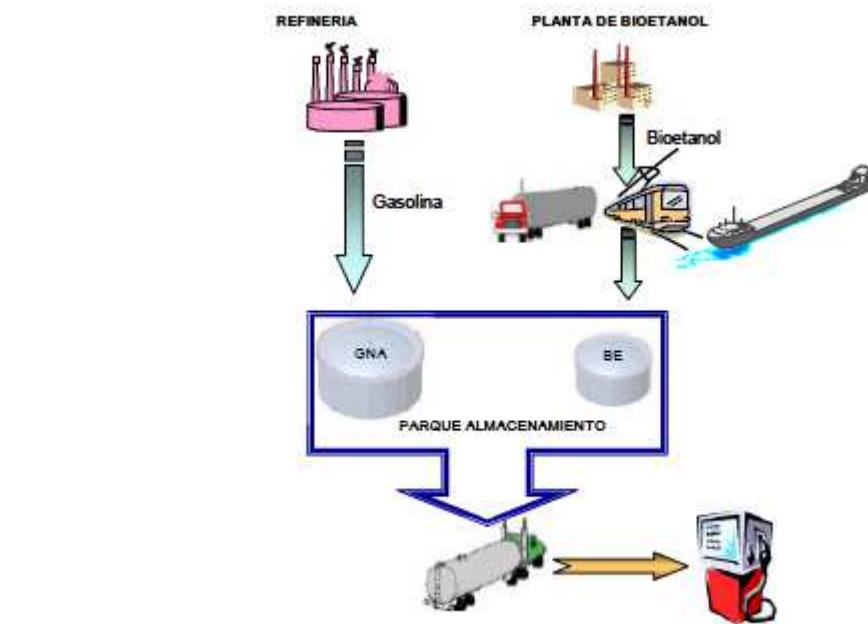


Imagen 198. Distribución del bioetanol



Fuente: CNE

Imagen 199. El bioetanol en España

## **BioDiésel**

El biodiésel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo,<sup>1</sup> mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiésel o gasóleo obtenido del petróleo.

El biodiésel puede mezclarse con gasóleo procedente del refino del petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiésel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50 [111], donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla.

El aceite vegetal, cuyas propiedades para la impulsión de motores se conocen desde la invención del motor diésel gracias a los trabajos de Rudolf Diesel, ya se destinaba a la combustión en motores de ciclo diésel convencionales o adaptados. A principios del siglo XXI, en el contexto de búsqueda de nuevas fuentes de energía, se impulsó su desarrollo para su utilización en automóviles como combustible alternativo a los derivados del petróleo.

El biodiésel descompone el caucho natural, por lo que es necesario sustituir éste por elastómeros sintéticos en caso de utilizar mezclas de combustible con alto contenido de biodiésel.

El impacto ambiental y las consecuencias sociales de su previsible producción y comercialización masiva, especialmente en los países en vías de desarrollo o del Tercer y Cuarto mundo generan un aumento de la deforestación de bosques nativos, la expansión indiscriminada de la frontera agrícola, el desplazamiento de cultivos alimentarios y para la ganadería, la destrucción del ecosistema y la biodiversidad, y el desplazamiento de los trabajadores rurales.

Se ha propuesto en los últimos tiempos denominarlo agrodiésel ya que el prefijo «bio-» a menudo es asociado erróneamente con algo ecológico y respetuoso con el medio ambiente. Sin embargo, algunas marcas de productos del petróleo ya denominan agrodiésel al gasóleo agrícola o gasóleo B, empleado en maquinaria agrícola.

### **Antecedentes históricos**

La transesterificación de los aceites vegetales fue desarrollada en 1853 por los científicos E. Duffy y J. Patrick, muchos años antes de que el primer motor diésel funcionase. El primer modelo de Rudolf Diesel, un monocilíndrico de hierro de 3 metros con un volante en la base funcionó por vez primera en Augusta (Alemania), el 10 de agosto de 1893. En conmemoración de dicho evento, el 10 de agosto se ha declarado "Día Internacional del Biodiésel". Diesel presentó su motor en la Exposición Mundial de París de 1900. Este motor es un ejemplo de la visión de Diesel, ya que era alimentado por aceite de cacahuete –un biocombustible, aunque no estrictamente biodiésel, puesto que no era transesterificado-. Diesel quería que el uso de un combustible obtenido de la biomasa fuese el verdadero futuro de su motor. En un discurso de 1912, dice: “el uso de aceites vegetales para el combustible de los motores puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden convertirse, con el paso del tiempo, importantes en cuanto a sustitutos del petróleo y el carbón de nuestros días”.

Durante los años veinte, los fabricantes de motores diésel adaptaron sus propulsores a la menor viscosidad del combustible fósil (gasóleo) frente al aceite vegetal. La industria petrolera amplió así su hueco en el mercado de los carburantes porque su producto era más económico de producir que la alternativa extraída de la biomasa. El resultado fue, por muchos años, la casi completa desaparición de la producción de combustibles a partir de biomasa.

Sólo recientemente la preocupación por el impacto ambiental y la menor diferencia de precios han hecho de los biocombustibles una alternativa válida.

A pesar del increíble uso de los derivados del petróleo como combustibles, durante los años veinte, treinta y la posguerra mundial, varios países (entre ellos Argentina) informaron de haber usado aceites como sustituto del diésel. Se detectaron problemas por la diferencia de viscosidad entre el aceite y el diésel, que producía depósitos dentro de la cámara de combustión y los inyectores. Algunos intentos para superar esto fueron aplicar una pirólisis y craqueo al aceite, mezclarlo con diésel de petróleo o etanol, o calentarlo.

El 31 de agosto de 1937, G. Chavanne de la Universidad de Bruselas, Bélgica [112], obtuvo la patente por “transformar aceites vegetales para su uso como combustibles”. La patente describía la transesterificación del aceite usando etanol o metanol para separar la glicerina de los ácidos grasos y reemplazarla con alcoholes de cadenas cortas. Esta fue la primera producción de biodiésel.

Más recientemente, en 1977, Expedito Parente, científico brasileño, inventó y patentó el primer proceso industrial de producción de biodiésel. Actualmente, Tecbio, la empresa de Parente, trabaja junto con Boeing [115] y la NASA [116] para certificar bioqueroseno.

Entre 1978 y 1996, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [117] estadounidense ha experimentado el uso de algas como fuente de biodiésel, dentro del Aquatic Species Program [118]. La experimentación del NREL, tras 16 años, está estancada debido a que el programa de investigación carece de financiación.

En 1979 se iniciaron en Sudáfrica investigaciones sobre cómo transesterificar aceite de girasol en diésel. Finalmente en 1983, el proceso de cómo producir biodiésel de calidad fue completado y publicado internacionalmente. Gaskoks [119], una industria austriaca, obtuvo esta tecnología y estableció la primera planta piloto productora de biodiésel en 1987 y una industrial en 1989.

Durante la década de los 90, se abrieron muchas plantas en muchos países europeos, entre ellos la República Checa, Alemania y Suecia.

En los años noventa, Francia ha lanzado la producción local de biodiésel (conocido localmente como diéster) obtenido de la transesterificación del aceite de colza. Va mezclado en un 5% en el combustible diésel convencional, y en un 30 % en el caso de algunas flotas de transporte público. Renault, Peugeot y otros productores han certificado sus motores para la utilización parcial con biodiésel, mientras se trabaja para implantar un biodiésel del 50%.

Francia empezó una producción local de biodiésel el cual se mezclaba en un 30% con diésel para transporte público. Renault [120] y Peugeot certificaron motores de camiones con uso parcial de biodiésel (alrededor del 50%). Durante el año 1998 se identificaban 21 países con proyectos comerciales de biodiésel.

En septiembre del año 2005, Minnesota fue el primer estado estadounidense que obligaba un uso de, al menos, un 2% de biodiésel.

En 2008, la ASTM (American Society for Testing and Materials) [121] publicó los estándares y especificaciones de mezcla de biodiésel.

### **Propiedades**

El biodiésel se describe químicamente como compuestos orgánicos de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta.

El biodiésel tiene mejores propiedades lubricantes y mucho mayor índice de cetano que el diésel de poco azufre. El agregar en una cierta proporción biodiésel al gasóleo reduce significativamente el desgaste del circuito de combustible; y, en baja cantidad y en sistemas de altas presiones, extiende la vida útil de los inyectores que dependen de la lubricación del combustible.

El poder calorífico del biodiésel es 37,27 MJ/L (megajulio por litro) aproximadamente. Esto es un 9% menor que el diésel mineral. La variación del poder calorífico del biodiésel depende de la materia prima usada más que del proceso.

El biodiésel es líquido a temperatura ambiente y su color varía entre dorado y marrón oscuro según el tipo de materia prima usada. Es inmiscible con el agua, tiene un punto de ebullición alto y baja presión de vapor. Su punto de inflamación (superior a 130 °C) es mucho mayor que el del diésel (64 °C) o la gasolina (-40 °C). Tiene una densidad de aproximadamente 0,88 g/cm<sup>3</sup>, menos que el agua.

Más allá, no tiene virtualmente ningún contenido de azufre y se suele mezclar como aditivo con el diésel de bajo contenido en azufre.

## **Carácterísticas**

### Ventajas

-El biodiésel disminuye de forma notable las principales emisiones de los vehículos, como son el monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles, en el caso de los motores de gasolina, y las partículas, en el de los motores diésel.

-La producción de biodiésel supone una alternativa en el uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que pueden quedar expuestas aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores.

-El biodiésel supone un ahorro de entre un 25% a un 80% de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los combustibles derivados del petróleo, constituyendo así un elemento importante para disminuir los gases invernadero producidos por el transporte.

-Por su mayor índice de octano y lubricación reduce el desgaste en la bomba de inyección y en las toberas.

-No tiene compuestos de azufre por lo que no los elimina como gases de combustión.

-El biodiésel también es utilizado como una alternativa de aceite para motores de dos tiempos, en varios porcentajes; el porcentaje más utilizado es el de 10/1.

-El biodiésel también puede ser utilizado como aditivo para motores a gasolina (nafta) para la limpieza interna de éstos.

### Inconvenientes

-La explotación de plantaciones para palmas de aceite (utilizadas para hacer biodiésel) fue responsable de un 87% de la deforestación de Malasia hasta el año 2000. En Sumatra y Borneo, millones de hectáreas de bosque se convirtieron en tierra de cultivo de estas palmeras y en los últimos años se ha conseguido más que doblar esa cifra, la tala y los incendios perduran. Hasta deforestaron por completo el famoso parque nacional Tanjung Puting de Kalimantan.[122] Orangutanes, gibones, rinocerontes, tigres, panteras nebulosa, etc, se van a extinguir por la destrucción del hábitat. Miles de indígenas han sido desalojados de sus tierras y 1500 indonesios fueron torturados.

Pero los gobiernos, mientras Europa siga comprando su palma de aceite para hacer biodiésel, seguirán promoviendo el cultivo de estas plantas para su propio beneficio.

-Debido a su mejor capacidad disolvente con respecto al petrodiésel, los residuos existentes son disueltos y enviados por la línea de combustible, pudiendo atascar los filtros, caso que se da únicamente cuando se utiliza por primera vez después de haber estado consumo diésel mineral.

-Tiene una menor capacidad energética, aproximadamente un 3% menos, aunque esto, en la práctica, no es tan notorio ya que es compensado con el mayor índice de cetano, lo que produce una combustión más completa con menor compresión.

-Otros problemas que presenta se refieren al área de la logística de almacenamiento, ya que es un producto hidrófilo y degradable, por lo cual es necesaria una planificación exacta de su producción y expedición. El producto se degrada notoriamente más rápido que el petrodiésel.

-El rendimiento promedio para oleaginosas como girasol, maní, arroz, algodón, soja o ricino ronda los 900 litros de biodiésel por hectárea cosechada. Esto puede hacer que sea poco práctico para países con poca superficie cultivable; sin embargo, la gran variedad de semillas aptas para su producción (muchas de ellas complementarias en su rotación o con subproductos utilizables en otras industrias) hace que sea un proyecto sustentable. No obstante, se está comenzando a utilizar la jatrofa para producir aceite vegetal y, posteriormente, biodiésel y que puede cultivarse incluso en zonas desérticas.

## **Compatibilidad con materiales**

### Plásticos

Es compatible con el polietileno de alta densidad. Al PVC lo degrada lentamente. Algunos polímeros los disuelve al contacto directo.

### Metales

Afecta a materiales basados en el cobre, también ataca el zinc, el estaño, el plomo y el hierro fundido. Los materiales de acero inoxidable y aluminio son inmunes.

### Caucho

El biodiésel descompone al caucho natural de algunos componentes de motores antiguos.

### Gelificación

Cuando el biodiésel se enfriá hasta determinado punto, algunas moléculas se agregan y forman cristales.

El combustible empieza a “nublarse” una vez que los cristales se hacen grandes (un cuarto de la longitud de onda de luz visible). Este punto se llama punto de enturbiamiento. Cuanto más frío esté el combustible, mayores son los cristales. La menor temperatura en la cual el biodiésel pasa por un filtro de 45 micrones se la llama punto de obstrucción de filtros en frío (CFPP en inglés). A menores temperaturas el biodiésel se convierte en gel y luego solidifica. Dentro de Europa, hay mucha diferencia en este punto entre países. La temperatura en la cual el biodiésel puro comienza a gelificarse depende de la mezcla de ésteres y, consecuentemente, de la materia prima usada. Por ejemplo, si se produce a partir de sebo, tiende a convertirse en gel cerca de los 16 °C.

Hay muchos aditivos que se le agregan al biodiésel para disminuir esta temperatura. Otra solución es mezclar biodiésel con diésel o queroseno. Otra es tener un tanque secundario de biodiésel acompañando al del diésel de petróleo: el primero arranca y calienta el segundo, y una vez alcanzada la temperatura necesaria, se cambia la alimentación.

### Con agua

El biodiésel puede contener pequeñas cantidades de agua, pero son problemáticas. Aunque el biodiésel no es miscible con el agua, es higroscópico como el etanol, es decir, absorbe el agua de la humedad atmosférica. Una de las razones para que el biodiésel sea higroscópico es la persistencia de los mono y diglicéridos sobrantes de una reacción incompleta. Estas moléculas pueden actuar como un emulsionante, permitiendo que el agua se mezcle con el biodiésel.[cita requerida] Por otro lado, puede haber agua residual debido al tratamiento o como resultado de la condensación del tanque de almacenamiento. La presencia de agua es un problema porque:

-El agua reduce el calor de combustión del combustible a granel. Esto significa más humo, mayores dificultades en el arranque, menor rendimiento energético.

-El agua causa la corrosión de los componentes vitales del sistema de combustible: las bombas de combustible, bombas de inyección, líneas de combustible, etc.

-El agua y los microbios que la acompañan atascan y estropean los filtros de papel para el combustible, lo que a su vez se traduce en un fallo prematuro de la bomba de combustible debido a la ingestión de partículas grandes.

-El agua se congela para formar cristales de hielo cerca de 0 °C (32 °F). Estos cristales proporcionan sitios para la nucleación y aceleran la gelificación del combustible residual.

-El agua acelera el crecimiento de las colonias de microbios, que pueden obstruir el sistema de combustible. Hay informes de usuarios de biodiésel que han calentado los depósitos de combustible para hacer frente al problema de los microbios.

-Además, el agua puede producir picaduras en los pistones de un motor diésel.

### **Mezclas**

Las mezclas de biodiésel y diésel convencional basada en hidrocarburos son los productos más habitualmente distribuidos para su uso en el mercado del gasóleo al por menor. Gran parte del mundo utiliza un sistema conocido como la "B", factor que indica la cantidad de biodiésel en cualquier mezcla de combustible: el combustible que contiene 20% de biodiésel tiene la etiqueta B20, mientras que el biodiésel puro se denomina B100. Las mezclas con 80 por ciento de biodiésel y 20 por ciento de diésel de petróleo (B80) se pueden utilizar en general en motores diésel sin modificar. El biodiésel también puede ser utilizado en su forma pura (B100), pero puede requerir algunas modificaciones del motor para evitar problemas de mantenimiento y rendimiento. Las mezclas de biodiésel (B100) con diésel de petróleo se puede realizar por diferentes métodos:

- 1) Mezclado en los depósitos. Tanto el biodiésel como diésel de petróleo se llevan a un depósito en la terminal de almacenamiento donde se mezclan y desde donde se distribuye la mezcla realizada.
- 2) En línea de mezcla. Los dos componentes provienen de depósitos diferentes en la terminal de almacenamiento y llegan al camión cisterna de forma simultánea: La mezcla final del biodiésel con el diésel de petróleo en la proporción deseada se realiza en la terminal de almacenamiento, en el brazo de carga del camión cisterna, lo que se conoce como “mezcla splash”.
- 3) Parquímetro bomba de mezcla. Tanto el biodiésel como diésel de petróleo están en depósitos diferentes en la estación de servicio o el punto de consumo. En el surtidor de combustible se marca la mezcla deseada y es el surtidor el que realiza la mezcla solicitada en el momento de servirla. Desde el punto de vista logístico la mejor opción es ésta.

## **Utilización de biodiesel**

Este es un combustible que se ha empezado a utilizar hace poco tiempo, no trae muchos inconveniente en el motor, ya que tiene un alto contenido lubricante (más que el gasoil fósil), por ende duplica la vida útil de los motores. Este para poder funcionar debe tener más cantidad de aire en la cámara de combustión.

Se dice que ha partir del año 1998 el biodiesel puede ser utilizado sin muchas modificaciones al motor, ya que estos vienen con mejor diseño y el único problema que este ocasiona es el desprendimiento de pintura del tanque, las conexiones y el desgaste de mangueras.

## **Materias primas**

La fuente de aceite vegetal suele ser aceite de colza, ya que es una especie con alto contenido de aceite, que se adapta bien a los climas fríos. Sin embargo existen otras variedades con mayor rendimiento por hectárea, tales como la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), la curcas o *jatropha*, camelina etc. También se pueden utilizar aceites usados (por ejemplo, aceites de fritura), en cuyo caso la materia prima es muy barata, y además se reciclan lo que en otro caso serían residuos.

Existen otras materias primas de las cuales se puede extraer aceite para utilizarlas en el proceso de producción de biodiésel. Las materias primas más utilizadas en la selva amazónica son la la *jatropha* o curcas (piñón en portugués), sacha inchi, el ricino (mamona en portugués) y la palma aceitera.

Además, otra materia prima utilizada es la grasa animal, la cual produce mayores problemas en el proceso de fabricación, aunque el producto final es de igual calidad que el biodiésel de aceite, exceptuando su punto de solidificación.

Una gran variedad de aceites pueden ser usados para producir biodiésel.

Entre ellos:

### Aceite vegetal sin usar.

Los aceites de colza y soja son los más usados. El aceite de soja representa el 90% de la materia prima para biodiésel en los Estados Unidos. También puede ser obtenido de carraspique (zurrón boliviano), *jatropha*, lino, girasol, palma, cocotero , aceite de camelina y cáñamo.

### Aceites vegetales usados

Grasas animales. Cerdo, gallina y los subproductos de la producción de ácidos grasos omega3 provenientes del pescado.

Algas. Las cuales pueden crecer usando materiales cloacales y sin desplazar la tierra usada para producir comida.

Aceite de halófitas como la salicornia. Éstas crecen en agua salada, generalmente en costas, donde no se puede cultivar otra cosa.

Muchas experiencias sugieren que los aceites usados son las mejores materias primas, empero, debido a que la disponibilidad es drásticamente menor a la cantidad de combustible de petróleo que se quema, la solución no es muy usada.

Las Grasas animales son subproductos de la producción de carne. A pesar de esto, no es eficiente criar animales (o atrapar peces) simplemente por su grasa, aunque el uso de los subproductos incrementa el valor de la industria ganadera. Sin embargo, producir biodiésel de grasas animales reemplazaría un pequeño porcentaje de uso de diésel de petróleo. Hoy en día, muchas productoras de biodiésel que trabajan con distintas materias primas, hacen combustible biológico a partir de grasas animales de muy buena calidad. Actualmente una empresa valorada en 5 millones de dólares está siendo construida en EE. UU., con la intención de producir 11.4 millones de litros a partir de 1 billón de kilogramos de grasa de gallina.

El alcohol puede ser metanol, que forma metilésteres, o etanol, que forma etilésteres. El proceso con etanol es más complicado que con metanol.

El metanol proviene del petróleo, aunque puede producirse por pirólisis de la madera. El etanol proviene de las plantas o del petróleo, y hay un método para destilarlo caseramente.

### **Cantidad de materia prima requerida**

La producción actual de aceites vegetales y grasas animales no es suficiente para reemplazar la demanda de combustibles fósiles. Es más, al aumentar la producción, se requerirán más fertilizantes y pesticidas, y más tierras serán desplazadas. En Estados Unidos, el consumo de combustibles fósiles es de 160 millones de toneladas, y la producción de aceites y grasas es de 16.3 millones de toneladas.

Si todas las tierras cultivables de los Estados Unidos (1.9 millones de kilómetros cuadrados) fueran usadas para plantar soja para biodiésel, llegaría con suerte a cubrir esta demanda de combustible de petróleo. Esta área se podría reducir considerablemente si se utilizaran algas. Se estima que para cubrir la demanda con aceite de algas, se necesitarían 40.000 kilómetros cuadrados en casos optimistas. Las ventajas de las algas son que se pueden cultivar en tierra no arable (desiertos y terrenos marinos) y su potencial es más alto que el de otras plantas.

### Rendimiento

Cultivo	Litros/hectárea
Palma	4752
Alga	3000
Cocotero	2151
Jatropha	2000
Colza	954
Árbol de sebo	907
Maní	842
Girasol	767
Soja	922
Maíz	700
Cáñamo	242

Tabla 27.Rendimiento de los cultivos de producción de BioDiésel

El rendimiento del combustible de algas no fue determinado precisamente, pero se dice que es de 12 veces más energía por hectárea que el girasol.

Se dice que la planta de jatropha tiene un gran rendimiento, pero depende mucho de las condiciones climáticas y del suelo. El rendimiento promedio es de 1,5 a 2 millones de toneladas en los lugares más favorables. Se cultiva en Filipinas, Malí e India; es resistente a sequías y puede compartir espacio con otros cultivos como el café, azúcar, frutas y vegetales.

Se adapta bien en terrenos desérticos lo cual reduce la deforestación.

## Obtención de biodiesel

Se obtiene básicamente el biodiesel partiendo desde la obtención de aceite de soja rudo con una acidez no mayor del 0,5 % (de ser mayor habrá que neutralizar dicha acidez con un agregado de soda cáustica).

Teniendo ya el aceite deseado se introduce en un reactor donde por medio de agitación por paletas y calefacción por camisa de vapor se lo lleva a uno 65/70 °C , por otro lado se prepara una solución de alcohol metílico y soda cáustica y se lo adiciona en forma graduada y siguiendo con la agitación durante unos 45 minutos. Con dicha operatoria logramos separar de los ácidos grasos la glicerina, luego de detener la agitación dejamos decantar la glicerina la cual se hará por diferencia de densidad y dicha glicerina precipitará al fondo quedando sobrenadando lo que ya podremos comenzar a llamar biodiesel luego de asegurar la decantación, purgamos por el fondo del reactor la glicerina .el bio obtenido se lo lava con agua para secuestrar todo vestigio de soda y trazas de glicerina en suspensión, y luego de pasar por una centrifugadora y secadora de humedad se lo envía a los depósitos correspondientes.

En la actualidad existen diversos procesos industriales mediante los cuales se pueden obtener biodiésel. Los más importantes son los siguientes:

1. Proceso base-base, mediante el cual se utiliza como catalizador un hidróxido. Este hidróxido puede ser hidróxido de sodio (sosa cáustica) o hidróxido de potasio (potasa cáustica).
2. Proceso ácido-base. Este proceso consiste en hacer primero una esterificación ácida y luego seguir el proceso normal (base-base). Se usa generalmente para aceites con alto índice de acidez.
3. Procesos supercríticos. En este proceso ya no es necesario la presencia de catalizador, simplemente se hacen a presiones elevadas en las que el aceite y el alcohol reaccionan sin necesidad de que un agente externo, como el hidróxido, actúe en la reacción.
4. Procesos enzimáticos. En la actualidad se están investigando algunas enzimas que puedan servir como aceleradores de la reacción aceite-alcohol. Este proceso no se usa en la actualidad debido a su alto coste, el cual impide que se produzca biodiésel en grandes cantidades.

**5. Método de reacción ultrasónica.** En el método reacción ultrasónica, las ondas ultrasónicas causan que la mezcla produzca y colapse burbujas constantemente. Esta cavitación proporciona simultáneamente la mezcla y el calor necesarios para llevar a cabo el proceso de transesterificación.

Así, utilizando un reactor ultrasónico para la producción del biodiésel, se reduce drásticamente el tiempo, la temperatura y la energía necesarias para la reacción. Y no sólo reduce el tiempo de proceso sino también de separación.<sup>2</sup> De ahí que el proceso de transesterificación puede correr en línea en lugar de utilizar el lento método de procesamiento por lotes. Los dispositivos ultrasónicos de escala industrial permiten el procesamiento de varios miles de barriles por día. Especialmente durante el último año el uso del equipo ultrasónico aumentaba significativamente a causa de sus ventajas económicas.

### **Estándares y regulación**

Los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME), denominados biodiésel, son productos de origen vegetal o animal, cuya composición y propiedades están definidas en la Unión Europea en la norma EN 14214, con una excepción del índice de yodo para España, cuyo valor máximo queda establecido en 140 en vez de 120 como propone la norma EN 14214. [123]

En España el biodiésel aparece regulado en el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes. Para las mezclas de biocarburantes con derivados del petróleo que superen un 5% de ésteres metílicos de los ácidos grasos o de bioetanol es obligatoria una etiqueta específica en los puntos de venta.<sup>3</sup>

### **NORMA EN 14214**

Estándares europeos que describen los requerimientos para FAME (ésteres de metanol). Existe en tres idiomas: inglés, francés y alemán. La última versión fue publicada en noviembre de 2008. Existen diferencias en la norma debido a los requisitos para clima frío.

Estas especificaciones fueron hechas por el CEN (Comité Europeo de Normalización)[124], una organización no lucrativa privada cuyo objetivo es fomentar la economía europea en el mundo, el bienestar de los ciudadanos y el medio ambiente.

### NORMA ASTM D6751 [125]

La ASTM (American Society of Testing and Materials) es una de las organizaciones voluntarias de estándares más grande del mundo. Establece estándares para materiales, productos, sistemas y servicios.

Estas especificaciones son para mezcla B100.

Propiedad	Límites	Unidad
Punto de inflamación	130,0 mín.	°C
Agua y sedimentos	0,050 máx.	% vol
Viscosidad cinemática a 40 °C	1,9 – 6,0	mm <sup>2</sup> /seg
Cenizas sulfatadas	0,020 máx.	% masa
Azufre (Grado S 15)	0,0015 máx.	ppm
Azufre (Grado S 500)	0,05 máx.	ppm
Corrosión en lámina de cobre	Nº 3 máx.	-
Índice de cetano	47 mín.	-
Punto de enturbiamiento	A informar por cliente	°C
Residuo carbonoso	0,050 máx.	% masa
Acidez	0,80 máx.	mg KOH/g
Glicerina libre	0,020 máx.	% masa
Glicerina total	0,240 máx.	% masa
Contenido de fósforo	0,001 máx.	% masa
Temperatura de destilación, equivalente en temperatura atmosférica, 90% recuperado	360 máx.	°C

Tabla 28. Estándares según norma ASTM D6751

### NORMA ASTM D7467 [126]

La ASTM aprobó una especificación para mezclas diésel que contienen entre 6 y 20% de biodiésel. Con esta nueva especificación los fabricantes de motores diésel pueden probar diésel B20 en los motores para asegurar su óptimo rendimiento. Actualmente, Chrysler [127] apoya el uso de B20 en su Dodge Ram [128]. De la misma forma, General Motors [129] acepta un B5 pero limita el uso de B20 a flotas del gobierno.

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	52	-
Agua y sedimentos	% vol.	-	0,05
Ceniza	% (m/m)	-	0,01
Azufre			
-S15	ppm	-	0,0015
-S500	ppm	-	0,05
Corrosión en lámina de cobre	Clasificación	-	No. 3
Índice de cetano	-	40	-
Residuo carbonoso	% (m/m)	-	0,35
Valor ácido	mg KOH/g	-	0,3
Estabilidad a la oxidación	horas	6	-
Lubricación	Micrones	-	520
Contenido de biodiésel	% volumen	6	20

Tabla 29. Estándares según norma ASTM D7467

### Investigaciones actuales

Se están llevando a cabo investigaciones para encontrar mejores materias primas y mejorar el rendimiento del biodiésel. Usando las ganancias actuales, vastas cantidades de tierra y agua se necesitarían para producir suficiente aceite para reemplazar completamente los combustibles fósiles. Se necesitarían el doble de área de Estados Unidos para soja o dos tercios para colza para cubrir las necesidades de calefacción y transporte de este país.

Muchas variedades de mostaza parda tienen un rendimiento muy alto y son muy útiles en la rotación de cultivo con cereales, y tiene la ventaja que las sobras después de producir el aceite son un muy buen pesticida natural.

La (Naval Facilities Engineering Service Center)[130] y las Industrias productoras de biodiésel de Santa Bárbara, California, están desarrollando nuevas tecnologías para la Armada y Marina de EE. UU., uno de los usuarios más importantes de diésel del mundo.

Un grupo de científicos españoles trabaja para Ecofasa, una compañía que anunció que iba a hacer biodiésel con basura. El combustible es fabricado a partir basura urbana tratada con bacterias para producir ácidos grasos.

### Biodiésel de algas

Desde 1978 a 1996, la U.S. NREL (National Renewable Energy Laboratory), experimentó el biodiésel de algas en su proyecto Aquatic Species Program. Un artículo publicado por Michael Briggs, del grupo de biodiésel en la universidad de New Hampshire, propone un reemplazo realista de todos los combustibles de vehículos usando algas con un contenido de aceite mayor del 50% que crecerían en estanques en plantas potabilizadoras.

La producción de aceite de alga no se ha llevado a cabo a escala comercial, pero estudios de factibilidad determinan que lo establecido arriba es posible. Además, las algas no disminuirían la producción de comida, ya que no requieren tierras arables ni agua potable.

### Hongos

Un grupo en la Academia Rusa de Ciencias en Moscú [131] publicó en un estudio en septiembre de 2008 que aislaron grandes cantidades de lípidos de hongos unicelulares y las convirtieron en biodiésel de una manera sencilla y económica.

Un descubrimiento reciente es la bacteria Gliocladium roseum. Ésta fue encontrada en los bosques patagónicos y tiene la capacidad única de convertir celulosa en hidrocarburos de longitud media, típicos del diésel.

### Biodiésel de tierras usadas de café

Investigadores de la universidad de Nevada, produjeron exitosamente biodiésel a partir de aceite derivado de tierras usadas de café. Su análisis indicaba que la tierra contenía entre un 10 y 15% de aceite. Una vez extraído el aceite, se sometió a procesos convencionales y se obtuvo biodiésel. Se estima que, por este proceso, producir el biocombustible costaría 20 centavos por litro. En la universidad dicen que es muy sencillo y que hay tantas plantaciones de café que se podrían hacer millones de litros anuales. No obstante, si se usan todos los campos de café en el mundo, la cantidad producida no llegaría al 1% del diésel usado en los Estados Unidos anualmente.

### **El biodiésel en España**

El siguiente gráfico representa el número y ubicación de las instalaciones de producción en España. Como se observa, en la actualidad existen cinco plantas de producción operativas. Su capacidad total de producción asciende a 119.627 Tm/año.

El biodiésel producido se destina tanto a ventas en estación de servicio como a ventas directas y a la exportación. En 2004 la producción acumulada de éster metílico superó las 14.000 toneladas, lo que supone un incremento del 139% en relación al año anterior.



Fuente: CNE

Imagen 200. El BioDiésel en España

## Hidrógeno

### Introducción

En la historia de la Química, la primera referencia al hidrógeno como tal aparece con la identificación de dos gases diferentes como formando parte del agua, por el inglés Henry Cavendish en 1766. Cavendish le da el nombre de aire inflable. Más tarde, Antoine Lavoisier le da el nombre por el que lo conocemos, hidrógeno, generador de agua.

Antes de que finalizara el siglo XVIII, el hidrógeno encontró su primera aplicación práctica, como ocurre frecuentemente, por el ejército francés para globos de reconocimiento. Más de un siglo después, Alemania lo empleó en sus dirigibles para cruzar el océano Atlántico e incluso como combustible para la propulsión de los llamados zeppelines. Esta empresa concluyó después de la catástrofe del Hindenburg en 1937.

Más tarde, antes y después de la segunda guerra mundial, el hidrógeno se empleó como combustible de motores de vehículos de todo tipo, incluidos locomotoras y submarinos, pero sin gran éxito. Y ello a pesar de la predicción de Julio Verne en su novela “La isla misteriosa” de que algún día el agua, bajo la forma de sus componentes hidrógeno y oxígeno, serviría como fuente inagotable de energía.

El auge del carbón en el siglo XIX y del petróleo en el siglo XX eliminaron toda posibilidad del uso masivo del hidrógeno. Solamente la industria química, primero con la producción de fertilizantes derivados del amoníaco y después con la necesidad de hidrógeno para eliminar azufre y otros componentes de las gasolinas y gasóleos de locomoción y como complemento en las síntesis de productos derivados del petróleo, mantuvieron en el mundo una producción sustancial del hidrógeno.

Más adelante, ya en la segunda mitad del siglo XX, la preocupación por el ambiente y los posibles efectos sobre el clima, el comienzo de la era espacial y la inquietud sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, ha traído de nuevo un gran impulso, sobre todo, de la industria automovilista por el empleo en gran escala del hidrógeno, lo que se ha llamado, erróneamente a mi modo de ver, la economía del hidrógeno.

El interés de las industrias aeroespacial y automovilista por el hidrógeno se debe a la llamada pila de combustible, donde el hidrógeno puede quemarse con el oxígeno, transformándose la energía de la combustión en electricidad. Este proceso fue ya descubierto en 1839 por el galés William R. Grove, pero su desarrollo comenzó en la década de los 1960 por la NASA para producir electricidad y agua en algunas de sus misiones espaciales.

Actualmente, un gran número de prototipos de las principales marcas de automóviles y autobuses ensayan pilas de combustible de tipos y combustibles diversos y ya se pueden ver gran cantidad de modelos en circulación.

Las razones principales son de tipo ambiental y de previsión sobre el posible agotamiento del petróleo, que hoy constituye la base energética actual de los países avanzados, especialmente del transporte. Otras dependen de sus propiedades específicas, así como también sus inconvenientes.

Su principal ventaja es que su combustión produce solo agua, lo que significa que no emite gases de efecto invernadero, como ocurre con los combustibles fósiles e incluso con la biomasa. Esto le hace particularmente apropiado para sustituir a los derivados del petróleo. La sustitución de éstos, sin embargo, tiene el grave inconveniente de no ser un combustible primario. Hay que producirlo con otros.

Su importancia radica en que es buen vector para transportar energía. La posibilidad de su almacenamiento le hacen competir favorablemente con la electricidad en algunos casos.

Una de sus propiedades importantes es la energía específica de su combustión. Su valor es de 120 megajulios por kg en comparación con 50 MJ/kg del gas natural o con 44,6 MJ/kg del petróleo. Esto se contrapone a la baja densidad que presenta tanto como gas licuado y a las dificultades de almacenamiento para sus aplicaciones al transporte.

No obstante, su capacidad de ser almacenado le hace apropiado como complemento de algunas energías renovables que funcionan intermitentemente o son irregulares como la eólica o la solar. Algunas instalaciones de este tipo funcionan o están en fase de proyecto en nuestro país.

### **Propiedades**

El hidrógeno es normalmente un gas. Es el elemento más abundante en el Universo y es el combustible de las estrellas y, evidentemente, del Sol, por lo que la energía que éste nos envía es la base de todos los procesos fisicoquímicos y biológicos que tienen lugar en la Tierra.

El hidrógeno está presente en forma molecular o iónica, pero a pesar de su abundancia no está disponible para nosotros. El posible yacimiento más próximo está en Júpiter, inaccesible por el momento. En la Tierra, desgraciadamente, el hidrógeno está combinado en su mayor parte formando agua, no hay hidrógeno libre y la corteza terrestre está formada principalmente por oxígeno, silicio, aluminio y otros elementos menores.

Deben destacarse algunas propiedades que son importantes y deberán ser tenidas en cuenta en muchos de los aspectos que se verán a continuación. Los primeros son el bajo punto de ebullición y la proximidad a la temperatura crítica. Los segundos son las bajas densidades del gas y del líquido. La tercera es el contenido en deuterio, que puede ser una de las bases de la energía nuclear de fusión, lo que no se tratará en esta presentación.

De las propiedades antes citadas se pueden deducir las dificultades de almacenar el hidrógeno, de transformar el gas en el líquido y de los problemas del almacenamiento del líquido.

En la tabla 2 aparece otro grupo de propiedades relacionadas con la seguridad de su manejo y de su empleo como son su elevado coeficiente de difusión en el aire, los límites de detonación e inflamabilidad y las temperaturas de ignición y de la llama.

### **Métodos de producción**

Debemos preguntarnos primero cuáles son las materias primas para obtener hidrógeno. Evidentemente, el primero es el mar, en el que el hidrógeno está en un 11,19% en peso. Todos los organismos vivos, animales y vegetales, contienen hidrógeno. Puede obtenerse por ello de la biomasa y de algunos productos de origen animal como el biogas. Y lo contienen los combustibles fósiles, gas natural, petróleo y carbón.

No obstante, ha de quedar claro que la molécula de agua es extraordinariamente estable y que en todos los casos es preciso aportar energía para obtener el hidrógeno.

Otra cuestión que, a veces se olvida, es que en nuestro mundo el hidrógeno no es una energía primaria y es preciso obtenerlo mediante alguna reacción química, bien de disociación del agua o por alguna reacción en que el hidrógeno es un producto de la reacción.

En los últimos años casi el 90% del hidrógeno producido se dedica a la fabricación de amoníaco, 50%, y en las refinerías de petróleo, 37%. La obtención de metanol, 8%, otros productos químicos, 4%, y diversas aplicaciones, 1%, completan una producción que en el mundo se eleva a unos 60 millones de toneladas anuales.

Los métodos industriales de producción de hidrógeno se basan principalmente en los combustibles fósiles. Según los países y su disponibilidad de materias primas se emplea el gas natural, el carbón o los derivados del petróleo y solamente en algunos la electrolisis del agua.

A escala mundial, el 48% de la producción utiliza el reformado catalítico de gas natural con vapor. Le siguen el 30% a partir de hidrocarburos, el 18% del carbón gasificado y el 4% por electrolisis.

La necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para evitar el efecto invernadero que provoca y las consecuencias previsibles del calentamiento de la Tierra y del posible cambio climático hace que actualmente se estudie profundamente la obtención de hidrógeno a partir de agua por métodos térmicos.

La alta temperatura necesaria para alcanzar un rendimiento apreciable indica que es necesario acudir a la utilización de catalizadores y mejor aún al empleo de ciclos a fin de reducir la temperatura máxima de trabajo y así requerir materiales que puedan funcionar en condiciones prácticas de resistencia mecánica y química adecuadas.

El creciente interés por las energías renovables como fuentes energéticas que no emiten dióxido de carbono ha hecho que se propongan métodos diversos de producción de electricidad que pueden utilizarse para obtener hidrógeno. El acoplamiento electricidad-hidrógeno puede servir para suplir el inconveniente de la electricidad de no poder ser almacenada. El hidrógeno, almacenado cuando no se emplee la electricidad, podrá ser utilizado en períodos de mayor demanda utilizando su combustión directa o las pilas de combustible para generar electricidad o su empleo en cualquier tipo de utilización en la industria.

Los métodos directos basados en la fotolisis con semiconductores o en la radiación no tienen, por ahora, más que un interés puramente científico. La falta de interés práctico, esta vez desde el punto de vista económico, se aplica a los métodos basados en la biomasa, tanto los basados en su reformado directo como el de productos derivados, tales como los biocombustibles (biofuel, biogas, alcoholes, etc).

En nuestro país hay diversas plantas piloto para producir hidrógeno mediante energías renovables. La primera de ellas fue la del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) [132], que está formada inicialmente por una sección fotovoltaica y una pila de combustible de ácido fosfórico y que funciona desde 1993.

Otras han sido instaladas posteriormente en diversos centros de Madrid y Barcelona.

### **Almacenamiento**

En las instalaciones que requieren un gran consumo de hidrógeno, la generación de éste se lleva a cabo en las cercanías con solo un almacenamiento intermedio a baja presión. Si la generación se hace lejos o sirve para instalaciones diferentes o alejadas se transporta por hidrogenoductos o a veces por ferrocarril o carretera.

El almacenamiento a bajas presiones no plantea problemas especiales y para ello se utilizan gasómetros semejantes a los de otros gases industriales. Se han empleado también, de manera semejante al gas natural, cavidades naturales: minas antiguas de sal (Reino Unido) o acuíferos (Francia).

El único problema es la baja densidad que hace precisos grandes volúmenes. La reducción de volumen por el empleo de mayores presiones (de 200 a 450 bares) suele hacerse en depósitos cilíndricos, lo que está prohibido en algunos países como Japón.

Una reducción aún mayor se logra mediante liquefacción. Sus inconvenientes principales se deben a la baja temperatura involucrada (punto de ebullición, 252,7°C). Por una parte, los depósitos deben estar muy aislados. Por otra, para la liquefacción se invierte una energía próxima a 1/3 de la que el hidrógeno puede rendir.

Además, el depósito debe estar comunicado con el exterior porque la temperatura crítica (239,8°C) está muy próxima a la de ebullición y existe el riesgo de sobrepresiones peligrosas.

La cuestión del almacenamiento se hace particularmente relevante cuando se trata de vehículos, para conjugar el volumen con la necesidad de su recarga y hay que ponderar la seguridad y las posibilidades de accidentes. La existencia de nuevos materiales de construcción, como los composites o materiales compuestos permite utilizar presiones de hasta 700 bares, pero en el caso de hidrógeno líquido el aislamiento hecho a base de capas de distintos aislantes limita la capacidad de almacenamiento.

Otros métodos de almacenamiento incluyen métodos fisicoquímicos en los que el equilibrio puede desplazarse con la temperatura y la presión. Los equilibrios buscados son de absorción por líquidos orgánicos e inorgánicos, por adsorción con carbón activo o nanotubos y por formación de hidruros con metales o mezclas de metales. Los más estudiados han sido los de hierro-titanio, lantano-níquel y magnesio-níquel.

Las investigaciones que ahora se realizan tratan de encontrar una solución razonable del compromiso entre capacidad de retención por el compuesto, cinética de formación del hidruro (tiempo) y condiciones de presión y temperatura para liberar el hidrógeno.

En algunos casos para vehículos se ha optado por el empleo de otros compuestos como gasolinas y alcoholes que, por reformado, produzcan el hidrógeno en el propio vehículo.

### **Transporte y distribución**

El transporte de hidrógeno gas por conducciones, hidrogenoductos, está menos extendido que el del gas natural. Suele hacerse en zonas industrializadas en que su generación está centralizada y las distancias involucradas son menores.

En todo caso, en ellos las presiones de transporte no son muy altas, dependiendo principalmente de la distancia y del uso final del hidrógeno.

La creación de un sistema de distribución semejante al de la electricidad, el petróleo y sus derivados o el más moderno, todavía en desarrollo del gas natural, requiere grandes inversiones, tecnología y equipamientos, además de tiempo.

Habría necesariamente que comenzar por grandes flotas, líneas de transporte, empresas municipales y tráfico en ciudades.

La distribución a automóviles podría hacerse con el equivalente a las gasolineras con hidrógeno líquido. Ya existen en diversos países estaciones de servicio en las que se presta este servicio. El hidrógeno gas a presión se sirve ya en flotas de autobuses como ocurre ya en algunas ciudades de España.

Se ha propuesto que, para acelerar el proceso de establecer un sistema general, se utilizaran algunos de los actuales gasoductos, tras modificar algunos componentes como los compresores, y observar el comportamiento del acero de las conducciones por su posible fragilización.

En Estados Unidos se transporta hidrógeno líquido en cisternas criogénicas sobre camión, vagón de ferrocarril y barcaza especialmente preparados.

En una fase posterior, más lejana, la red de conducciones podría ampliarse a otros menesteres. Hay pocos datos acerca de los costes o precios del hidrógeno tanto dependiendo del proceso seguido para su obtención como de los costes previstos para el suministro en estaciones de servicio.

## **Seguridad**

Esta es una de las cuestiones más debatidas para un futuro empleo masivo del hidrógeno o al menos en las ciudades. El recuerdo de la tragedia del dirigible alemán “Hinderburg”, que utilizaba hidrógeno para su sustentación, está en la historia de los empleos frustrados del hidrógeno.

Es clave bajo esta consideración su masa molecular, la más baja de los elementos gaseosos, que da idea de su difusividad y de su baja densidad.

Otras igualmente importantes son la temperatura de ignición y la toxicidad.

El gran intervalo de sus mezclas con aire y la velocidad de propagación de la llama favorecen una posible explosión, mientras que la difusividad y la densidad tienden a reducir su probabilidad, especialmente en espacios abiertos.

En espacios cerrados, el escape de hidrógeno tiene lugar con disminución de la temperatura lo que reduce el riesgo. Por otra parte, la reacción química transcurre con reducción de volumen por lo que en vez de explosión lo que ocurre es una Implosión

## **Materiales**

En condiciones de presión y temperatura no muy diferentes de las ambientales, el hidrógeno no presenta problemas respecto al uso de materiales corrientes. La fragilización, que afecta seriamente a las propiedades mecánicas de los aceros, aparece cuando se utilizan presiones superiores a 100 atmósferas y sobre todo temperaturas altas. En cualquier caso, los aceros al carbono deben ser observados si se emplean en contacto con hidrógeno.

Los aceros de alta resistencia, las aleaciones níqueltitánio y, en menor medida, los aceros inoxidables austeníticos son también susceptibles a la fragilización.

Por el contrario, no se fragilizan por el hidrógeno el aluminio, el cobre y las aleaciones cobreberilio.

## **Pilas de combustible**

Es fácil prever un aumento notable en los usos masivos actuales del hidrógeno en sus dos principales destinos: la fabricación de amoníaco y el refino de petróleo. El amoníaco es la base de la industria de fertilizantes que han de servir para atender la creciente población del mundo y el aumento de su nivel de bienestar.

En las refinerías el hidrógeno se emplea para reducir el contenido en azufre de los crudos y para incrementar la proporción de productos ligeros por el creciente uso de crudos pesados.

También aumentará en otros usos de la industria química como son las producciones de metanol, benceno, ciclohexano, oxialcoholes, anilina y muchos más, en la hidrogenación de grasas para la industria alimentaria y en la industria metalúrgica para la reducción de óxidos y la obtención de preconcentrados.

Sin embargo, si se desarrolla la llamada “economía del hidrógeno” el mayor incremento de la producción será con destino a la automoción y el transporte y parcialmente a la generación de electricidad, todo ello por la utilización de la célula o pila de combustible.

En esencia, una pila de combustible es un sistema electroquímico que convierte directamente la energía química del hidrógeno al reaccionar con oxígeno, en electricidad.

Esto tiene como principal ventaja el alto rendimiento que se puede obtener en el proceso. Muy superior al de la combustión, que para la producción de energía tiene como límite el ciclo de Carnot. El rendimiento máximo de la transformación directa viene dado por el cociente entre la energía libre y la entalpía del proceso.

Este rendimiento teórico en la reacción de combustión del hidrógeno para dar agua es del orden del 95% en comparación con el 33-38% de la combustión.

Es evidente que este rendimiento máximo disminuye en la práctica por los fenómenos irreversibles y su ánodo y cátodo y las diversas resistencias en el electrolito y otros compuestos de la pila.

Se obtienen así rendimientos entre el 60 y el 70%. El modelo más sencillo de pila consta de dos electrodos, un ánodo, negativo, y un cátodo, positivo, ambos con platino como catalizador separados por un electrolito.

El hidrógeno entra en la pila por el ánodo y allí se disocia en iones hidrógeno y electrones. Los iones hidrógeno pasan a través del electrolito hasta el cátodo.

Los electrones del ánodo emigran por un circuito exterior hasta el cátodo donde reaccionan con los iones hidrógeno y el oxígeno para dar agua.

Para obtener un mayor voltaje se emplea un cierto número de unidades, es decir, un acoplamiento en serie. La intensidad a obtener depende de la superficie necesaria.

La pila de combustible es una invención del siglo XIX. Se la atribuye el abogado inglés William R. Grove en 1839, aunque hay un antecedente en una publicación del suizo Christian F. Schnbein el año anterior. Los modelos actuales se desarrollaron durante el resto del siglo XIX y la primera parte del XX, pero solo cuando la NASA americana, en la década de los 1960, instaló una pila de combustible en uno de sus vehículos espaciales, no comenzaron los trabajos de investigación y desarrollo de las grandes empresas como General Electric [133], British Petroleum[134] y algunas otras.

Más recientemente, las preocupaciones por el ambiente y por los recursos energéticos han contribuido a su desarrollo, estimulado además por el éxito de las instaladas en la lanzadera espacial Shuttle y en el Ariane europeo.

Los diversos tipos existentes difieren en el electrolito utilizado y, por tanto, en el ión involucrado, en el catalizador, que suele ser platino o níquel y en la temperatura de funcionamiento. El conjunto de características condiciona sus aplicaciones.

Las aplicaciones futuras más previsibles y de mayor importancia corresponden a los ámbitos del transporte y de la producción de electricidad. Algunos valores típicos de las pilas que reúnen las características más apropiadas para alimentar automóviles, camiones, autobuses e incluso aviones desde los puntos de vista de potencia, recorridos sin repostar y rendimientos se dan en la tabla 14. Su rendimiento puede ser superior, pero, por ahora, su recorrido sin repostar no es comparable a los motores de explosión y combustión y solo supera al motor eléctrico.

Durante los últimos años, las grandes empresas automovilísticas, los fabricantes de pilas y algunos centros de I+D y Universidades han unido sus fuerzas para obtener experiencia en diversos tipos de pilas y vehículos con distintos combustibles y métodos de almacenamiento de hidrógeno.

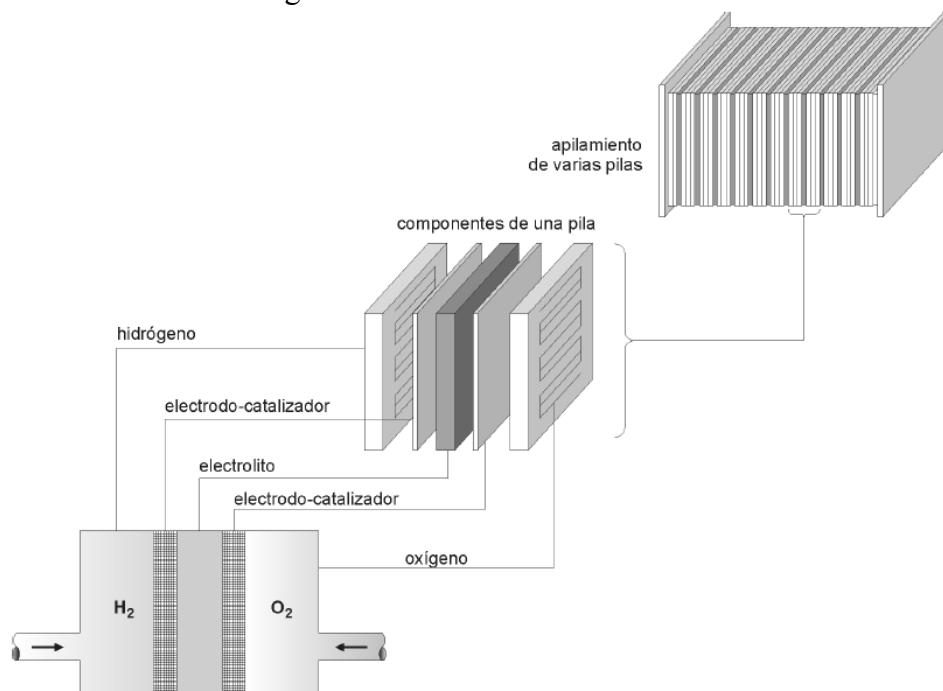


Imagen 201. Pilas de combustible.

El más corriente combustible es el hidrógeno gas a presión pero también se utilizan el hidrógeno líquido, el reformado de metanol y algunos hidruros. En algunos casos se dispone un generador auxiliar de electricidad para el arranque o para atender picos de demanda que suele consistir en una batería de acumuladores.

El problema más importante para seleccionar el combustible en los vehículos, especialmente en los automóviles pequeños, es el volumen ocupado por el depósito correspondiente. El hidrógeno gaseoso, aún a presión, ocupa un gran volumen y aunque el hidrógeno produzca tres veces más energía que la gasolina, la cantidad en masa que incorpora es relativamente baja por lo que hay que repostar con gran frecuencia. En su mayoría los fabricantes de vehículos optan por el empleo del hidrógeno líquido, hidruros o metanol para los vehículos de menor tamaño y, en cambio, por el gas a presión para aquellos, como autobuses o vehículos de transporte, en el que el volumen destinado al depósito de combustible es menos crítico.

Es evidente que en el caso de los hidruros como en el del metanol también cuenta el volumen de la unidad de descomposición o del reformado, respectivamente.

Aparte de las ventajas inherentes a las pilas, su aplicación a los vehículos hace tener otras como es su facilidad de arranque a cualquier temperatura, ya que la pila PEM funciona a baja temperatura y no necesita llegar a las altas temperaturas a las que funcionan los motores de explosión.

Otra ventaja es su fácil adaptación y por ello su inmediata respuesta a las variaciones de la demanda.

Las ventajas principales del uso del hidrógeno es su ausencia de emisiones contaminantes.

El hidrógeno no es una energía primaria. Es solo un vector para su transporte y utilización.

Como vector solamente puede competir con la electricidad por su más fácil almacenamiento. Para el transporte solamente puede competir con los hidrocarburos en cuanto a su no emisión de gases de efecto invernadero. Puede complementar a la electricidad. Para producir hidrógeno hay que utilizar una fuente de energía primaria u otra forma de energía derivada como la electricidad.

El almacenamiento del hidrógeno gas no presenta dificultades pero requiere un gran desarrollo en su aplicación a la automoción en forma líquida.

La distribución para transportes terrestres depende del establecimiento de una red adecuada, lo que requiere evidentemente un aumento notable del número de vehículos y debe comenzar por las flotas de camiones y autobuses de recorridos fijos.

El empleo de las pilas de combustible, que tienen un rendimiento energético mucho más elevado que la combustión, es una forma de atenuar las pérdidas en la transformación térmica del hidrógeno, pero requieren todavía considerable experiencia industrial para aumentar su duración y rendimiento y reducir sus costes de inversión y operación.

## **Gas Natural**

Se denomina gas natural vehicular (GNV por sus siglas en español o NGV por sus siglas en inglés), al subproducto gaseoso del petróleo que se utiliza como combustible. Muchas veces se usa el término gas natural vehicular como sinónimo de gas natural comprimido, y en otros casos la combinación gas natural comprimido vehicular (GNVC). Sin embargo, el GNV puede ser también gas natural licuado, que también es usado como combustible vehicular, aunque en muchísima menor medida.

El Gas Natural Vehicular no es el mismo gas de uso doméstico, ya que el gas de uso doméstico es una mezcla de propano y butano, y el GNV es gas Metano, la diferencia entre los dos viene dada básicamente por la humedad presente en el propano, y ausente en el metano. Este es comprimido generalmente a 3.000 PSI para almacenar la mayor cantidad de metros cúbicos en los cilindros, lo que brinda mayor autonomía al vehículo.

La aplicación a vehículos es muy simple, son motores que funcionan igual que los motores de gasolina, mediante combustión por encendido provocado. Los vehículos pesados (camiones y autobuses) utilizan sólo el gas, mientras que los vehículos ligeros (turismos y furgonetas) suelen llevar un pequeño depósito de gasolina como reserva o seguridad.

<b>País</b>	<b>Vehículos anfibios</b>	<b>Estaciones de servicio</b>	<b>Porcentaje del parque automotor</b> <i>[cita requerida]</i>
Argentina	1.650.000	1.400	21,7%
Perú	425.513	1.442	25,0%
Pakistán	1.550.000	1.606	24,9%
Brasil	1.425.513	1.442	10,0%
Italia	432.900	1.142	1,1%
India	334.820	321	2,3%
Irán	263.662	179	23,9%
Estados Unidos	146.876	1.340	0,1%
Colombia <sup>1</sup>	340.000	614	7,26% <sup>2</sup>
China	127.120	355	0,4%
Ucrania	100.000	147	2,0%

Tabla 30. Análisis del uso de GNV

El uso del GNV reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno en más de un 85% y en un 25% las de monóxido de carbono; no se emiten partículas sólidas ni dióxido de azufre, no aumentan o incluso disminuyen ligeramente las emisiones de dióxido de carbono, por otro lado, no contiene plomo ni trazas de metales pesados; y garantiza un menor nivel de otras emisiones toxicas, hoy todavía no reguladas, que cualquier otro combustible fósil.

En el aspecto económico, el gas natural permite un ahorro medio de más del 28% en euro/km respecto al gasoil, utilizado principalmente en vehículos profesionales. Por otra parte, el motor de gas natural consigue ahorros adicionales al requerir un menor mantenimiento y ofrecer una mayor vida útil.

Por otra parte, se trata de una tecnología consolidada, y de hecho, los principales fabricantes del sector de la automoción cuentan con modelos de este tipo de vehículos vendidos en serie y con las mismas garantías que los demás del mercado.

Asimismo, no se pierde capacidad ni en el habitáculo ni en el maletero, y según el organismo encargado de las inspecciones de vehículos en Alemania (TUV), son igual de seguros que los de gasolina o gasóleo e incluso tienen un peligro de incendio o explosión menor.

Los responsables europeos se proponen unos porcentajes de sustitución del petróleo por el GNV del 6% para 2010, 7% para 2015 y 10% para 2020.

En este sentido, algunos países como Argentina, Pakistán o Brasil vienen apostando por esta tecnología desde hace años. Así, según datos de la empresa Gas Natural, Argentina disponía en 2007 de 1.663.340 vehículos y 1.713 estaciones de servicio; Pakistán 1.650.000 y 1.847; Brasil 1.476.000 y 1.561, respectivamente.

Europa, Alemania, Francia y Reino Unido cuentan con programas específicos para su desarrollo, si bien es Italia el país europeo más involucrado en su uso, con 433.000 vehículos, 609 estaciones y más de 50 años de experiencia. Asimismo, la Comisión Europea, en su Comunicación COM (2001)547 identificaba al gas natural, los biocombustibles y el hidrógeno, como los principales combustibles alternativos. Así, los responsables europeos se proponen unos porcentajes de sustitución del petróleo por el GNV del 6% para 2010, 7% para 2015 y 10% para 2020.

## **Gas natural vehicular en España**

La utilización de este combustible en España es bastante escasa y se reduce casi exclusivamente a autobuses y camiones de recogida de residuos urbanos. Así, en 2007 había 1.663 vehículos y 41 estaciones de carga. Madrid (350 buses y 337 camiones de recogida de residuos) y Barcelona (251 y 83 respectivamente) son las ciudades con una mayor flota de estos vehículos. Gracias al GNV, España evita anualmente la emisión de 23 toneladas de CO<sub>2</sub>, 300 toneladas de NOx y 17 toneladas de partículas a la atmósfera, además de 7.000 toneladas de CO<sub>2</sub>.

En aras de aumentar su uso la Ley 22/2005 de 18 de noviembre de 2008, estableció un impuesto para el gas natural en su uso como carburante de 0,4140 céntimos de euro/KWh, un precio 6,5 veces inferior al del gasóleo, lo que generó, que diversas instituciones promovieran la utilización de estos vehículos para reducir la contaminación urbana.

Asimismo, el Instituto de Ahorro y Diversificación Energética (IDAE) [135] y la mayor parte de las comunidades autónomas ofrecen subvenciones para la compra de estos vehículos, así como para la financiación de estaciones de carga.

Por su parte, la empresa Gas Natural es pionera en la introducción del GNV en España. En este sentido, en el reciente Salón Internacional del Automóvil de Madrid [136] presentaba su línea de negocio "gnAuto" [137], y a modo de ejemplo, cuatro vehículos impulsados con gas natural de conocidas empresas del sector. Además, los responsables de esta compañía han firmado acuerdos con diversas instituciones y asociaciones para el uso de estos vehículos, como el Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón o la Cooperativa Valenciana de Taxistas (TAXCO) [138].

No obstante, los expertos consideran que para un desarrollo real del GNV son imprescindibles acciones coordinadas entre todos los actores implicados, para contar así con un marco legal y fiscal que lo hagan económicamente atractivo, ayudas para la adquisición de estos vehículos y unas infraestructuras mínimas para repostar.

En cuanto a los sistemas de carga, el llenado del GNV puede realizarse de manera rápida. Existe la posibilidad de efectuar un almacenamiento intermedio, que permite la carga de los vehículos en unos tres minutos, o un llenado lento, más adecuado para repostar, por ejemplo, grandes flotas durante la noche.

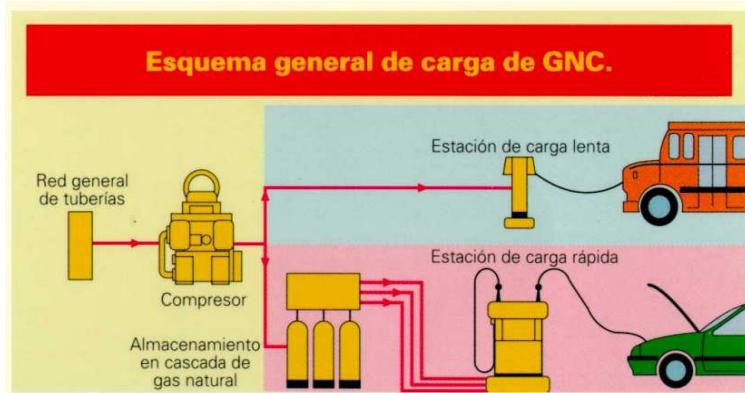


Imagen 202. Abastecimiento de GNV

#### **4.2.7.3.- Marco regulatorio de los biocombustibles en Europa**

Muy numerosas han sido las iniciativas que, en el ámbito comunitario, se han venido adoptando a lo largo del tiempo para fomentar la producción y el uso de los biocarburantes en base al reconocimiento de tales ventajas.

Entre las iniciativas más importantes cabe destacar el Libro Blanco sobre Energías Renovables de 1997, que recomienda el establecimiento de un objetivo de producción de 18 millones de toneladas de biocombustibles líquidos en 2010; el Libro Blanco de la Comisión Europea “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”, que propone la utilización en el sector del transporte de carburantes alternativos como los biocarburantes para reducir la dependencia del petróleo; o el Libro Verde “Hacia una estrategia europea para la seguridad de suministro”, que establece el objetivo de sustitución del 20% de los carburantes convencionales por carburantes alternativos en el sector del transporte por carretera para el año 2020.

Por su parte, la Directiva 2003/30/CE [139] del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte establece qué productos se consideran biocarburantes y obliga a cada Estado miembro a velar por que se comercialice en sus respectivos mercados una proporción mínima de biocarburantes, estableciéndose para ello objetivos indicativos nacionales. Como valor de referencia para estos objetivos se fija el 2% de toda la gasolina y el gasóleo comercializados en los respectivos mercados con fines de transporte a más tardar el 31 de diciembre de 2005, y el 5,75% a más tardar el 31 de diciembre de 2010.

En cuanto al ámbito fiscal la Directiva 2003/96/CE [140] del Consejo, de 27 de octubre de 2003, por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad, permite a los Estados miembros aplicar exenciones totales o parciales o reducciones del nivel de imposición a los productos energéticos utilizados bajo control fiscal en el ámbito de proyectos piloto para el desarrollo tecnológico de productos más respetuosos con el medio ambiente, a los combustibles obtenidos a partir de recursos renovables y a los biocarburantes.

El uso de biocarburantes en el transporte es una herramienta de la que la Unión Europea puede servirse para reducir su dependencia de las importaciones energéticas, con las consiguientes repercusiones para la seguridad del abastecimiento energético a medio y largo plazo. Además, forma parte del paquete de políticas y medidas a implementar por la Unión Europea para el cumplimiento de los compromisos adquiridos en materia de cambio climático en el ámbito del Protocolo de Kioto.

Todas estas iniciativas han sentado las bases para el desarrollo del mercado de los biocarburantes en Europa si bien los índices de penetración de estos productos en la mayor parte de los Estados miembros se encuentran aún alejados de los objetivos indicativos marcados por la propia normativa comunitaria, debido a la persistencia de barreras de diverso tipo que lo obstaculizan.

Aunque existen razones que justifican la conveniencia de la utilización de biocarburantes como sustitutivos de la gasolina o el gasóleo en el sector del transporte, en la actualidad aún persisten diversas barreras que impiden su desarrollo a gran escala.

Cabe señalar que, teniendo en consideración la información enviada por los Estados miembros, la Comisión Europea, según establece asimismo el artículo 4 de la Directiva 2003/30/CE, elaborará un informe de evaluación para el Parlamento Europeo y el Consejo, a más tardar el 31 de diciembre de 2006, y cada dos años desde esa fecha, sobre los progresos realizados en los Estados miembros respecto a la utilización de biocarburantes y otros combustibles renovables. Basándose en dicho informe, la Comisión presentará propuestas, cuando proceda, sobre la adaptación del régimen de objetivos indicativos establecido en la Directiva. En el caso de que el informe concluyera que podrían no alcanzarse dichos objetivos indicativos por razones injustificadas o que no tienen relación con nuevas pruebas científicas, la Comisión plantearía, en la forma apropiada, objetivos nacionales que podrían incluso adquirir el carácter de obligatorios .

#### **4.2.7.4.- Los biocarburantes en España:**

##### **4.2.7.4.2.- El marco regulatorio en España**

La Ley 34/1998, de 7 de octubre, del Sector de Hidrocarburos [141], en su disposición adicional decimosexta, señala que “Se consideran biocombustibles los productos que a continuación se relacionan y que se destinan a su uso como carburante, directamente o mezclados con carburantes convencionales:

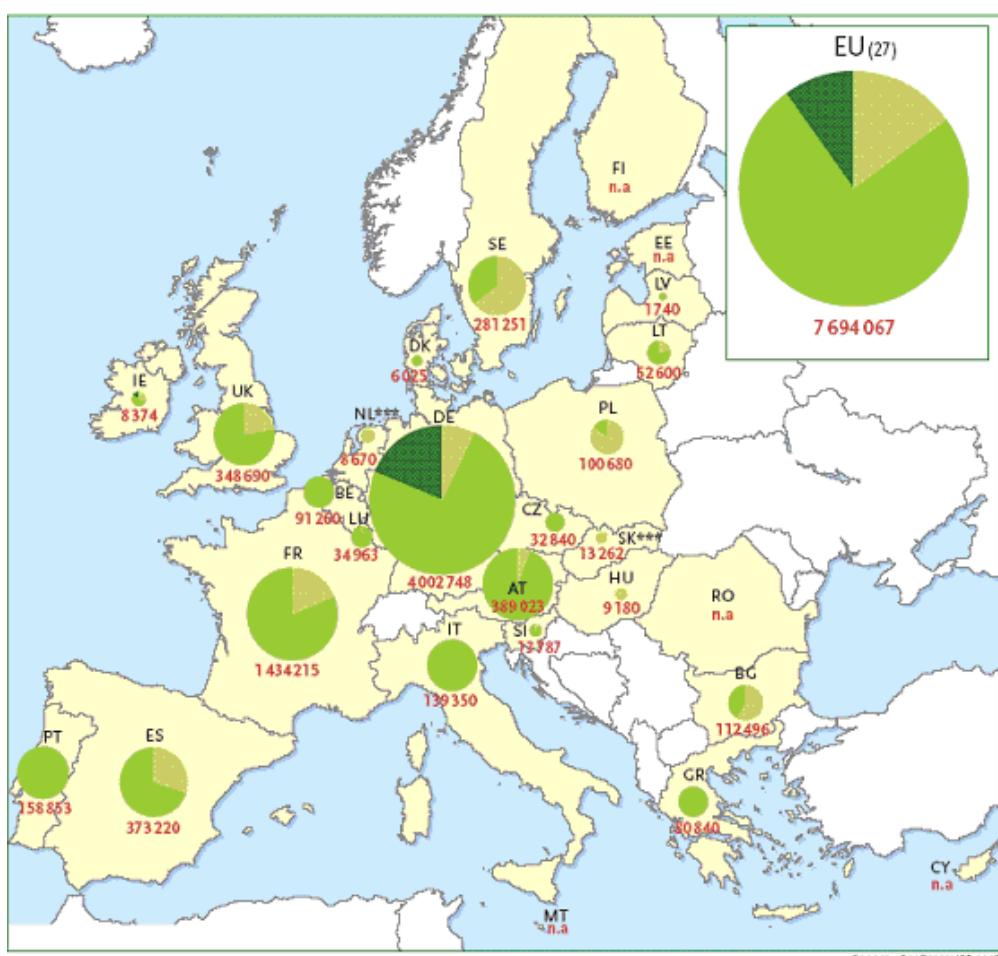
- a) El alcohol etílico producido a partir de productos agrícolas o de origen vegetal (bioetanol), ya se utilice como tal o previa modificación química.
- b) El alcohol metílico (metanol) obtenido a partir de productos de origen agrícola o vegetal, ya se utilice como tal o previa modificación química.
- c) Los aceites vegetales.
- d) El aceite vegetal, modificado químicamente”.

Además, establece que, a efectos de dicha Ley, la distribución y venta de estos productos se regirá por lo dispuesto en la misma para el mercado de productos derivados del petróleo.

El anterior Plan de Fomento de Energías Renovables, que fue aprobado por el Consejo de Ministros en su reunión del día 30 de diciembre de 1999, fijaba, en el área de biocombustibles, un objetivo de producción para 2010 de 500.000 tep/año, de los cuales 100.000 tep/año corresponderían a biodiésel.

Por otra parte, el artículo 6 del Real Decreto-Ley 6/2000,[142] de 23 de junio, de Medidas Urgentes de Intensificación de la Competencia en Mercados de Bienes y Servicios, ya señala que el Gobierno debe promover la utilización de biocombustibles garantizando, en todo caso, la calidad final de los productos comercializados.

Para ello, en virtud de dicho Real Decreto-Ley se creó la Comisión para el estudio del uso de biocombustibles, presidida por el Ministerio de Economía. Esta Comisión ha elaborado un informe, de fecha 30 de junio de 2001, en el que se abordan las implicaciones fiscales, medioambientales y económicas derivadas de la utilización de los biocombustibles, las posibles medidas para promover su utilización y las actuaciones en materia de investigación y desarrollo para reducir sus costes de producción.



#### LÉGENDE/KEY

Consommation de biocarburants destinés au transport dans l'Union européenne en 2007 (en tep)\*, avec les parts respectives de chaque filière/Biofuels consumption for transport in European Union in 2007 (in toe)\* with respective shares of each sector.

█ Bioéthanol/Bioethanol    █ Biodiesel/Biodiesel    █ Autres/Other

Imagen 203. Consumo de biocarburantes en Europa en 2007

Finalmente el Real Decreto 1700/2003 [143] por el que se fijan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, y el uso de biocarburantes (en adelante, RD 1700/2003), transpone parcialmente al ordenamiento español la Directiva 2003/30/CE antes citada. En este Real Decreto únicamente se reconocen como biocarburantes el bioetanol de origen vegetal y el biodiésel tipo FAME de origen vegetal o animal y se establecen sus especificaciones. No se incluyen en dicho Real Decreto referencias a los objetivos pretendidos de porcentajes mínimos de comercialización de biocarburantes en el mercado que determina la Directiva 2003/30/CE.

El RD 1700/2003 contempla asimismo que se exigirá un etiquetado específico en los puntos de venta para mezclas de biocarburantes con derivados del petróleo que excedan el 5% de contenido en biodiésel o bioetanol.

En relación con las mezclas de biocarburantes con gasóleos, su disposición adicional primera establece que las administraciones públicas supervisarán las repercusiones que se deriven del uso de biocarburantes en mezclas con gasóleo superiores al 5% en vehículos no modificados y se adoptarán, en su caso, las medidas oportunas para garantizar el respeto de la legislación vigente en materia de límites de emisión.

Finalmente, con objeto de mantener los más altos requisitos de seguridad respecto a las actividades logísticas de las mezclas de biocarburantes con carburantes convencionales, la disposición adicional segunda del mencionado Real Decreto exige que en las instalaciones destinadas al almacenamiento y expedición de mezclas de biocarburantes con gasolinas y/o gasóleos, será necesario por parte de los titulares de las instalaciones la realización de las correspondientes comprobaciones técnicas, tanto en lo referente a los requisitos de compatibilidad de los materiales de las instalaciones mecánicas (tanques, tuberías, aparatos surtidores, etc.), con las citadas mezclas, como en lo relativo a la posible presencia de agua en las mencionadas instalaciones.

#### **4.2.7.4.2.1.- Producción, logística y distribución**

##### **Fiscalidad y ayudas a la producción**

Una de las medidas más habitualmente empleadas para incentivar la demanda de biocarburantes consiste en aplicar incentivos de tipo fiscal. En España esta política se introdujo por medio de la Ley 53/2002, de 30 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social [144], que adicionó el artículo 50bis a la Ley de Impuestos Especiales (Ley 38/1992, de 28 de diciembre)[145].

Esta modificación estableció un tipo impositivo cero para los biocarburantes, aplicándose el tipo especial exclusivamente sobre el volumen de biocarburante aun cuando éste se utilice mezclado con otros productos.

La Directiva 2003/96/CE [146] por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad permite a los Estados miembros que apliquen para los biocarburantes exenciones o reducciones en las accisas que gravan los hidrocarburos. La reciente transposición de la Directiva, operada por medio de la Ley 22/2005 [147], ha variado el encaje formal de los biocarburantes en la estructura del impuesto especial pero sin cambios en la tributación efectiva, que implica la aplicación de un tipo cero a los biocarburantes.

La argumentación económica utilizada para defender la exención o reducción fiscal de los biocarburantes se basa en consideraciones de eficiencia, fundamentadas en una valoración del diferente grado de externalidad negativa que provoca el consumo de estos combustibles, más ecológicos que los convencionales. Frente al escenario alternativo de utilización de carburantes de origen fósil, los biocarburantes reducen la emisión de gases de efecto invernadero y previenen la lluvia ácida, con las consecuencias positivas o, por decirlo más correctamente, menos negativas sobre la calidad ambiental general y la salud de la población. A esas razones se añaden las de tipo político y estratégico como la reducción de la dependencia de las importaciones de crudo y el aumento de la seguridad del suministro.

Los efectos económicos de estos incentivos no pueden entenderse sin hacer referencia a su carácter relacional. Y ello en un doble sentido. En primer lugar, este mecanismo actúa modificando los precios relativos de las diferentes alternativas de carburantes, por lo que la imposición efectiva que soportan los carburantes convencionales representa la ventaja fiscal de los biocombustibles. La disminución relativa del precio y, por tanto, la eficacia incentivadora de la exención dependerán de la carga fiscal que soporten los carburantes de origen fósil. Esta disminución será mayor cuando se establecen tipos de gravamen elevados sobre el consumo de hidrocarburos fósiles y será menos apreciable en diseños tributarios, como el nuestro, que realizan una menor internalización de los costes externos de naturaleza ambiental que provoca la utilización de carburantes convencionales y fijan tipos de gravamen más bajos en los impuestos sobre hidrocarburos.

En segundo lugar, la existencia de diferencias significativas en imposición de los hidrocarburos en los distintos estados miembros puede provocar un efecto de desviación de comercio.

Por ello interesa conocer cuál es el nivel del incentivo fiscal con respecto al del resto de países de la UE. En el caso español, como puede comprobarse en el precio medio de los carburantes es considerablemente inferior al de la media ponderada de la Unión (39,6c€/litro para la gasolina y 17,5 c€/litro para el gasóleo), siendo de naturaleza tributaria la principal razón que explica esta diferencia: la suma de IVA e impuestos especiales representa 60,2 % del precio medio de la gasolina en la UE frente a un 50,2 % en España (53,7 % y 44,3 %, respectivamente en el caso del gasóleo).

Gracias a la exención fiscal, el margen de beneficio de los biocarburantes es más alto en aquellos países europeos con tributación más alta para los carburantes convencionales (por ejemplo, Reino Unido, Alemania, Francia o Países Bajos) en cierta forma esteriliza el incentivo que estamos comentando, y es una de las razones que explica el destino para la exportación de buena parte de la producción nacional de biocarburantes en el momento presente.

### **Impacto sobre el consumo**

En nuestro país, la exención fiscal no ha tenido un impacto significativo sobre el consumo.

Las razones pueden ser diversas:

- a) la ausencia de una planificación integral del problema que hubiera previsto medidas de acompañamiento para fomentar la implantación de este carburante en flotas cautivas, entre las que cabría destacar el transporte público urbano, que ha apostado en mayor medida por la utilización de gas natural.
- b) la existencia de competencias atribuidas a administraciones diferentes según el tipo de transporte del que se trate, puede dificultar este proceso
- c) en lo que se refiere al fomento en el suministro directo en el surtidor por parte de los consumidores, se aprecian importantes reticencias por parte de los distribuidores, lo que implica la existencia de un reducido número de puntos de venta.
- d) los consumidores, encuentran escaso incentivo económico a su empleo, ya que la exención solo abarca al porcentaje de biocarburante en el contenido y, además, existen pocos incentivos a trasladar al usuario la rebaja fiscal;
- e) el carácter transitorio de la exención fiscal (hasta el año 2012), y la incertidumbre sobre la situación a partir de ese momento, generan escasos incentivos para fomentar, tanto el desarrollo de adaptaciones en los vehículos para hacer compatible el uso de biocarburantes con las garantías técnicas de los mismos, como el fomento de su incorporación al consumo de gasóleo en porcentajes reducidos.
- f) los fabricantes han expresado su preocupación por la ausencia de una norma que regule las características técnicas que debe tener este producto a la hora de extender las garantías de sus productos sobre aquellos que consumen biodiésel en porcentajes elevados.

Ante este panorama, y ante la necesidad de incentivar el consumo de cara a cumplir con los objetivos de la Directiva 2003/30/CE y del PER, parece inexcusable adoptar medidas adicionales; entre ellas la más efectiva es, sin duda, la fijación opelege de un porcentaje obligatorio de biocarburantes en las mezclas tradicionales.

En resumen, la coexistencia de distintos niveles de imposición sobre hidrocarburos en la UE, así como la posible apropiación del margen fiscal por parte de los suministradores de carburantes, limita la efectividad de las medidas fiscales y hacen más adecuados mecanismos alternativos.

Entre ellos el más eficaz es el de la obligación legal de mezclas, también denominada política RFTO (Renewable Fuel Transport Obligation) [148] impuesta a los suministradores de combustibles para que incorporen un determinado porcentaje de carburante biológico al conjunto de carburantes fósiles que comercializan. Esta obligación ya ha sido acordada con éxito en numerosos países (Brasil, EE.UU., Francia, Italia, Países Bajos, Alemania, Reino Unido, entre otros), aunque en algunos aún no es exigible.

## **5. Conclusiones**

El análisis del presente estudio ha permitido evidenciar la situación actual del motor alternativo de combustión interna. Se ha tratado, cómo ya se comentó al inicio del proyecto, de generar una perspectiva global del estado del arte y del actual nivel de desarrollo tecnológico de los sistemas tanto de aumento de eficiencia, cómo de reducción de emisiones en el MACI.

Inicialmente se ha buscado y ya que es uno de los procesos sustancialmente más característicos del motor alternativo, analizar el fenómeno de la combustión, entrando en los principios básicos que la definen.

Es en este proceso donde se genera toda la energía mecánica encargada de mover la cadena de transmisión del vehículo, pero también es donde se crean todos los productos nocivos en mayor o menor proporción dependiendo del tipo de motor, combustible y características cuantitativas del proceso.

Es por tanto un núcleo importantísimo de estudio:

Será mediante las relaciones estequiométricas que lo definen, de la calidad y la naturaleza de los combustibles y del fundamental diseño de la cámara de combustión, cómo se podrá limitar la emisión de componentes contaminantes.

Y eso es debido a que la cantidad de aire-combustible introducido, todo ello regulado mediante la inyección y la admisión, serán decisivos en la formación de emisiones.

Obviamente la calidad y la naturaleza de los combustibles definirán las reacciones químicas que se generan, es por ello que el uso de combustibles alternativos es un tema en auge, la mayoría de ellos producen cómo resultado de la reacción componentes considerados cómo no nocivos para la salud y para el medio ambiente.

Por ultimo, un estudiado diseño de la cámara de combustión y de la cabeza del pistón generará, una mayor homogeneidad de la mezcla, reduciendo la formación de hollín y de partículas.

Es por tanto que han sido tanto la inyección, cómo la admisión y el accionamiento flexible de válvulas, que permite reducir el consumo adaptándose a los regímenes de funcionamiento del motor, objetos de estudio en este proyecto.

En la optimización de la inyección tanto en motores Diesel como gasolina, se ha podido observar que el control electrónico es fundamental, debido a que se pueden adaptar los procesos a las exigencias, siempre variables del motor. Por otro lado, otra vertiente de estudio, ha sido el aumento más que notable de la presión de inyección, que permite mejorar la formación del chorro de combustible, cómo de su proceso de mezcla con el aire introducido en la cámara.

Una línea de mejora que generaría cambios sustanciales y que de hecho ya se está implementando, serían soluciones próximas a la denominada inyección Dual que, aparte de aumentar el número de inyectores optimiza el uso del combustible, generando una vaporización de este, permitiendo una mezcla mucho más homogénea, al reducir el diámetro de las gotas de carburante, de modo, que se reduce el consumo y se optimiza la inyección, reduciendo las emisiones.

Pero, como ya se ha puntualizado, es necesario la conjunción del mayor número de mejoras posibles para conseguir la mayor cantidad de resultados posibles, es por tanto que otro de los campos de estudio ha sido el accionamiento flexible de válvulas, que permite de una manera muy eficiente y siempre pasando por la regulación electrónica, adaptar los procesos a las exigencias, y es por ello que a través de regulaciones de alzadas de válvulas, se puede conseguir controlar los flujos de entrada y salida de aire, regulando la mezcla de combustible y obteniendo respuestas adecuadas a las necesidades.

Cómo se puede observar, mediante un control de la inyección y de la admisión se controla exhaustivamente la combustión, y es que el control de parámetros de entrada, nos permite conocer definiendo el proceso intermedio a la perfección, los de salida, que son entre otros, la respuesta del motor y las características de los gases de escape.

Previo a la intervención de las válvulas, es el proceso de admisión, sobre el que también se interviene, por ejemplo y cómo se ha podido observar, mediante la denominada admisión variable, que busca mejorando el diseño de los tubos de admisión, mejorar las respuesta del motor dependiendo de las revoluciones.

Por otro lado una de las soluciones más novedosas e ingeniosas, es la variación de la relación de compresión en función de las necesidades, un estudiado sistema, que cambia algunos aspectos de la estructura interna del bloque, permitiendo regular otro de los inputs del motor y que hasta la fecha venía definido en el diseño y era un parámetro invariable. Este sistema permite tanto adaptar el par de salida, cómo reducir los consumos y las emisiones del motor, tal y cómo se ha podido observar en el estudio del apartado pertinente. Es una idea en desarrollo por algunas empresas y que busca generar un sistema, sostenible económicamente y fácilmente desarrollado en masa. Es por tanto que muchos de los prototipos en construcción, siguen sometidos a modificaciones.

Otro de los ámbitos fundamentales en la reducción de emisiones una vez que estas de un modo u otro dejan la cámara de combustión, son los sistemas de post-tratamiento de gases de escape, y es mediante la implementación de soluciones a lo largo de la línea de escape, cómo se busca reducirlas o limitarlas.

Los sistemas son múltiples y cada uno trata de aportar respuestas diversas a la problemática. Una de las innovaciones que se pueden resaltar en este campo es la añadición de soluciones, cómo por ejemplo, de urea ( AdBlue) que ligados a un método de reducción catalítica selectiva ( SCR) consigue reducir la cantidad de NOx producto de la combustión.

Los sistemas EGR, también están, debido a su sustancial contribución a reducir los niveles de emisiones, sometidos a estudio continuo, tratando de imponer mejoras en su diseño y buscando medidas que permitan aumentar el rendimiento en su funcionamiento.

Sin olvidar los catalizadores y filtros de partículas, componentes fundamentales en la reducción de componentes nocivos y de los que su funcionalidad depende el diseño y materiales que los constituyen.

Por otro lado, la sobrealimentación sigue siendo una de las mejoras más notables implementadas en los motores, los turbocompresores de geometría variable constituyen una prueba evidente de la optimización de estos sistemas, tratando también de adaptarlos a las condiciones de circulación que se planteen, mejorando su eficiencia y prestaciones. Es una de las vertientes de mejora de los motores que más atractivo despierta, ya que su descubrimiento supuso cambios trascendentales en los motores de combustión.

Finalmente, se han analizado en el proyecto los distintos biocombustibles que actualmente se encuentran tanto en uso, como en estudio, ya que generar alternativas al petróleo, supone apoyarse de análisis minuciosos tanto de viabilidad, de capacidad productiva para cubrir la demanda, como de búsqueda de fuentes de desarrollo y de infraestructuras consecuentes. Es por ello que se encuentran sobre la mesa numerosas soluciones por las que apostar, cada una con sus ventajas y sus inconvenientes, y será la más adecuada, obviamente, aquella que presente mayor sostenibilidad y que por consiguiente ayude a reducir los niveles de emisiones de manera general, ya que las emisiones se generan en todo el proceso productivo y de uso de; en este caso el combustible.

Es en ese ámbito donde hay que incidir, porque carece de sentido reducir las emisiones en la combustión de estos, cuando en su tratamiento previo, su almacenaje y transporte se están generando niveles de contaminación desproporcionados.

Obviamente se requerirá de soluciones técnicas que den respuesta a las necesidades de producción elevadas y de almacenaje, sin olvidar que el objetivo de encontrar combustibles alternativos no es generar monopolios o oligopolios de fuentes de energía, sino buscar fuentes respetuosas con el medio ambiente y que se puedan mantener en el tiempo, sirviendo para abastecer a los métodos, distintos o adaptados a los actuales, de propulsión vehicular.

Las empresas de la automoción ya se están apoyando en numerosas técnicas, para intentar diseñar motores adaptados a la problemática actual. Los sistemas se mejoran y perfeccionan continuamente, con el objetivo principal de aumentar la eficiencia de estos para crear motores más respetuosos con el entorno.

Es, por otro lado, en este entorno tecnológico, donde otras alternativas al motor de combustión están surgiendo, tanto con combustibles alternativos que sustituyan al sobreexplotado crudo, generando menos contaminación en su combustión, cómo sistemas alternativos de propulsión, cómo son los vehículos electricos o hibridizados.

Es importante destacar, que la máxima de estas investigaciones es encontrar sistemas de propulsión, que cumplan con las exigencias tecnológicas y sociales actuales, y que se apoyen en recursos totalmente sostenibles a largo plazo, tanto a nivel económico, como medioambiental y humano.

Es por tanto que los actuales estudios se centran en numerosas vertientes, los denominados *greencars*, por ejemplo, son expuestos cómo alternativas sostenibles y con cero emisiones, cuando realmente no lo son, ya que el propio generador de energía motriz que incorpora el vehículo se debe apoyar de una red eléctrica, que con muchas probabilidades vendrá abastecida de plantas de generación de energía con altos índices de emisiones.

Los combustibles alternativos, por otro lado, son soluciones viables, pero que en muchos casos, generarían sobreexplotaciones de cultivos, que se habrían desarrollado en entornos deforestados con el único fin del aumento de una capacidad productiva que busca abastecer un mercado global exigente e insaciable.

Cómo conclusión, fruto de la realización de este proyecto y del interés en la materia, considero que es prematuro darle al motor de combustión fecha de caducidad, debido a que, ha sido en estos últimos años donde se ha demostrado el interés de las empresas del sector y de las instituciones, de empezar a fomentar alternativas, pero es obvio que generar un cambio de modelo de estas características es lento y paulatino, pués ,cómo ya se ha comentado, es fundamental la búsqueda de un modelo sólido y muy estudiado, que se apoye en fuentes de abastecimiento fiables y que por otro lado sea sostenible y respetuoso. Todo ello viene seguido de una generación de infraestructuras, de un cambio productivo, de la modificación de las legislaciones y un sin fin de cambios, que no se pueden producir en un plazo de tiempo mínimo.

Es por todo esto, que lógicamente las empresas se apoyan en modelos ya muy insertados en la sociedad que sigan generando una rentabilidad económica, y es que el motor de combustión es el modelo más rentable y más desarrollado tecnológicamente que hay en la actualidad, asegurando una fiabilidad y unas prestaciones únicas, es por ello que las investigaciones seguirán centrándose en su perfeccionamiento, y con toda seguridad, conoceremos nuevas normativas de reducción de emisiones.

Es reclacable hacer notar, que esto no significa que los modelos alternativos no vayan a ser desarrollados, puesto que paralelamente proseguirán los estudios para el fomento de energías limpias y cada vez más se dejarán ver por la vía pública más flotas electricas, hibridas, o con combustibles diferentes a los que se encuentran en uso actualmente.

Es necesario el perfeccionamiento de estos sistemas para facilitar su uso y su implementación en los vehículos, aumentando sus autonomías, mediante baterías estables con componentes poco o nada nocivos para la salud.

El desarrollo en masa de vehículos alternativos se escapa actualmente de la sostenibilidad económica, serán necesarios años de estudio, de mejora y de abaratamiento de costes para que puedan convertirse en una realidad y mientras esto no se produzca, la solución más barata, asentada y perfeccionada sigue siendo el MACI.

Las exigencias que rodean al futuro desarrollo del motor de combustión están claras, y las legislaciones cada vez tratan de ser más restrictivas respecto a lo que de contaminación se trata, por tanto es fundamental seguir investigando, mejorando, creando y desarrollando, las soluciones futuras y presentes, que por un lado puedan ser incorporadas sobre motores más eficientes y limpios, ó, que por otro generen una lenta pero posible sustitución del histórico motor de combustión de una manera sostenible y tecnológicamente viable.